Jean-Marc Piéplu



GPS et Galileo

Systèmes de navigation par satellites











EYROLLES

Remerciements

Mes remerciements vont :

À Aude pour ses encouragements, ses conseils et sa patience

À Christian pour ses illustrations avec le logiciel SatOrb de Sup'Aéro

À Catherine, Jean-Louis et Olivier pour leurs remarques et relectures attentives

Table des matières

Introduction

Depuis la mise en place du système GPS (Global Positioning System) au cours des années 1980-1990, les applications de la navigation par satellite se développent et s'étendent dans de multiples domaines.

Conçus principalement pour des applications militaires, les signaux GPS sont maintenant couramment utilisés dans des applications civiles telles que les transports maritimes, aériens et terrestres, la géologie, les travaux publics, la prospection pétrolière, l'agriculture, et de nouvelles applications ne cessent de voir le jour, comme dans les douanes et la justice, ou sont tout simplement associées au téléphone mobile dans la vie de tous les jours.

Avec le programme Galileo, l'Europe est non seulement en voie d'assurer son indépendance dans ce domaine stratégique, mais se donne les moyens d'étendre les capacités et les potentialités actuellement offertes par le GPS.

D'autres systèmes de navigation par satellite, moins connus du grand public, sont déjà en place. C'est le cas du système russe Glonass ou des systèmes complémentaires au GPS, tels EGNOS en Europe ou le WAAS aux États-Unis.

Les systèmes GPS ou Glonass et bientôt Galileo offrent des services de positionnement disponibles en permanence dans le monde entier pour un nombre illimité d'utilisateurs. Par ailleurs, l'amélioration des techniques industrielles rend possible la production de récepteurs pour un marché de masse.

Pour toutes ces raisons, la navigation par satellite est un marché en pleine croissance, qu'on peut comparer à celui de la téléphonie mobile ou d'Internet, même s'il reste aujourd'hui difficile de prédire l'ampleur réelle qu'il prendra dans les années à venir.

Ce livre a pour objectif de faire mieux connaître cette nouvelle technologie en détaillant ses principes de fonctionnement, ses applications ainsi que les différents systèmes sur lesquels elle est fondée.

Organisation de l'ouvrage

Les chapitres 1 et 2 permettent de comprendre comment un utilisateur peut se positionner à l'aide de satellites. Les principes fondamentaux des mesures de distance entre un récepteur et les satellites y sont présentés, ainsi que le principe du calcul de la position. Sont également abordées les technologies essentielles sur lesquelles sont fondés ces systèmes : les constellations de satellites, les horloges atomiques ultrastables, le traitement du signal et l'architecture des récepteurs. Une présentation des différentes sources d'erreurs permet en outre de comprendre les facteurs qui conditionnent les différentes performances recherchées par les utilisateurs.

Le chapitre 3 donne un aperçu des différentes applications déjà en place ou en cours de développement et permet de mesurer l'importance que la navigation par satellite est en train de prendre dans la société moderne.

Les chapitres 4 et 5 présentent en détail les systèmes GPS et Galileo en insistant sur les spécificités de chacun d'eux du point de vue des services offerts aux utilisateurs et des caractéristiques techniques. L'organisation du contrôle de ces systèmes, à caractère stratégique, est également détaillée.

Les chapitres 6 et 7 décrivent les autres systèmes de navigation par satellite, comme le système russe Glonass, ainsi que les systèmes régionaux complémentaires du GPS et de Galileo. Les conditions et les avantages d'une utilisation combinée de ces différents systèmes y sont analysés.

1

La navigation par satellite

Nous nous penchons dans ce premier chapitre sur les principes de fonctionnement des systèmes de navigation par satellite.

Ces systèmes à l’immense potentiel ont été rendus possibles par les progrès réalisés depuis cinquante ans dans la mise au point d’horloges ultrastables et dans le développement de vastes constellations de satellites.

Nous allons passer en revue l’ensemble des phénomènes qui améliorent ou dégradent les performances des récepteurs GPS, et bientôt Galileo.

Le principe du positionnement par satellites Galileo et GPS

Les systèmes Galileo et GPS reposent sur le même principe de fonctionnement :

- Une constellation de satellites en orbite autour de la Terre :
  - Chaque satellite de la constellation diffuse en permanence un signal vers l’ensemble des zones visibles de la Terre.
  - Chaque satellite inclut dans son signal les informations donnant sa position précise dans l’espace.

- Un nombre illimité de récepteurs utilisateur. Chacun de ces récepteurs est doté des propriétés suivantes :
  – Réception des signaux provenant d'au moins quatre satellites de la constellation (nous verrons pourquoi quatre satellites sont nécessaires au récepteur pour se positionner).
  – Mesure des distances qui le séparent de ces quatre satellites.
  – Calcul de sa position en combinant les quatre mesures de distance avec les informations de position de chacun des satellites et qui sont diffusées dans leur signal.

La figure 1.1 illustre ce principe de fonctionnement.

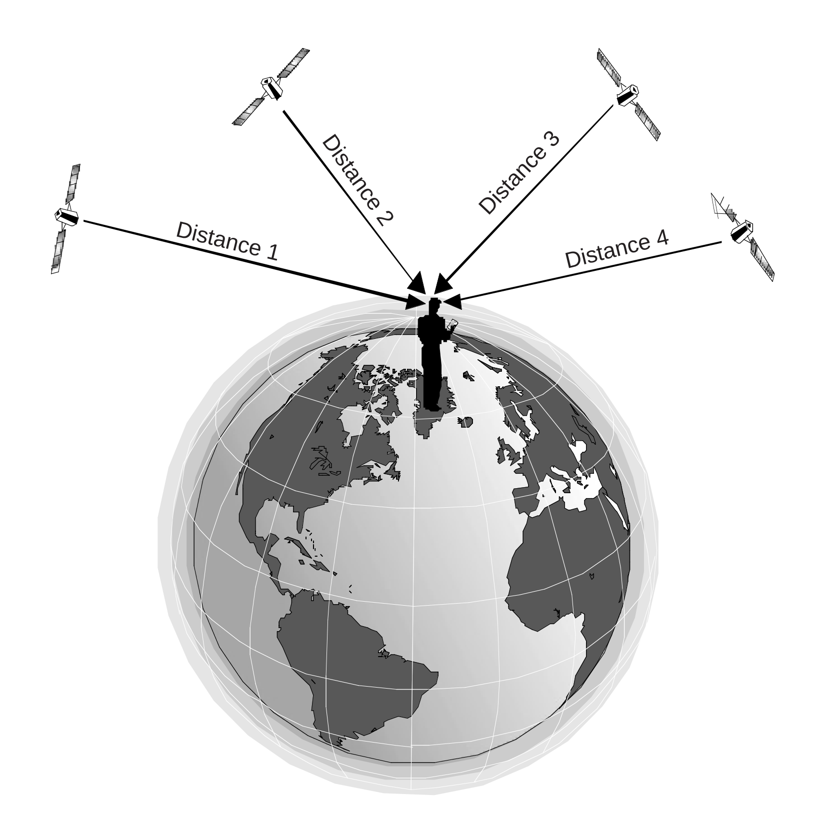


Figure 1.1

Principe de positionnement par satellites d'un récepteur

À partir de la réception des signaux des satellites, chaque récepteur établit sa position de manière autonome grâce à un minicalculateur intégré.

Qu'est-ce qu'une position ?

On appelle *position* un jeu de trois paramètres, qui permet de repérer un lieu dans l'espace par rapport à une référence connue. Par exemple, la longitude, la latitude et l'altitude permettent de repérer n'importe quel lieu à la surface terrestre. De même, ce sont les distances d'un objet par rapport à un mur de gauche, à un mur de devant et au sol qui permettent de le positionner dans l'espace d'une pièce.

Nous concevons ainsi intuitivement que nous ayons besoin de trois mesures par rapport à des repères dont la position est connue pour déterminer la position d'un objet quelconque.

Un récepteur GPS ou Galileo établit lui aussi sa position au moyen de mesures de distance par rapport à des satellites dont la position est connue. Mais pourquoi lui faut-il quatre mesures, et non trois, pour établir sa position ?

Pour le comprendre, nous devons nous intéresser à la façon dont est obtenue la mesure de distance, dite aussi mesure de *ranging*, entre le récepteur et un satellite.

La mesure de distance

Imaginons un voyageur sans montre dans un train qui part à 12 h 00 de la gare de Toulouse (heure donnée par l'horloge de cette gare), dont le train roule à la vitesse constante de 120 km/h, sans arrêt sur le trajet, et qui arrive à la gare de Montpellier à 14 h 00 (heure donnée par l'horloge de cette gare). Nous pouvons déduire que la distance qui sépare Toulouse de Montpellier est de 240 km (120 km/h × 2 heures).

Les mesures de distance effectuées par les récepteurs GPS et Galileo sont fondées sur le même principe. Le satellite (gare de Toulouse) possède une horloge et introduit dans son signal, à des instants très précis (disons à chaque nouvelle seconde de son horloge), une modulation, ou « bip » (qui correspond à notre train), laquelle se propage jusqu'au récepteur de l'utilisateur.

Le récepteur (gare de Montpellier) possède également une horloge, par rapport à laquelle il mesure très précisément à quel instant ce bip est reçu. En comparant l'instant où le bip a été émis et celui où il est reçu, le récepteur de l'utilisateur peut déterminer le temps de propagation du bip entre le satellite et le récepteur.

Connaissant la vitesse de propagation du signal provenant des satellites, qui correspond à la vitesse de la lumière, le récepteur peut déduire la distance parcourue par ce signal, et donc la distance qui le sépare du satellite.

La figure 1.2 illustre comment il est possible de déterminer une mesure de distance à partir d'une mesure de temps.

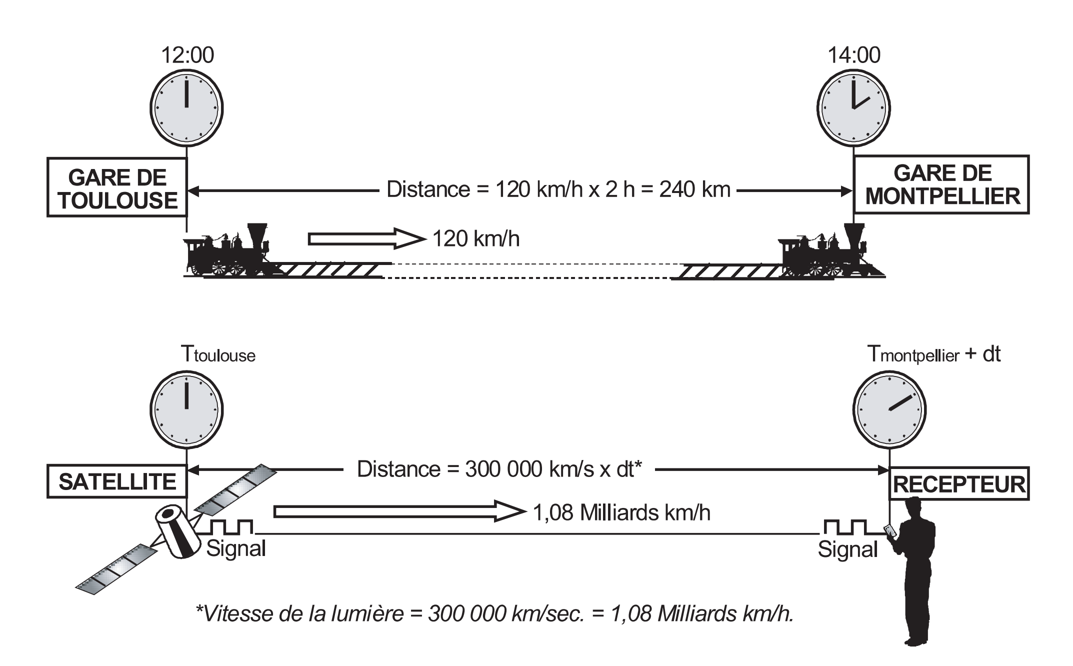


Figure 1.2

Principe de la mesure de distance

Afin de déterminer précisément ce temps de propagation, il est indispensable que l'horloge du satellite et celle du récepteur soient parfaitement synchronisées. En effet, une différence de synchronisation des deux horloges sera interprétée comme un temps supérieur ou inférieur de propagation du signal, et donc comme une distance plus grande ou plus petite.

Dans notre exemple, imaginons que l'horloge de la gare de Montpellier avance d'une minute. Le voyageur pensera avoir mis une minute de plus pour faire le trajet et fera donc une erreur de 2 km sur sa mesure de la distance entre Toulouse et Montpellier.

De la même façon, les ordres de grandeur des écarts de synchronisation des horloges des récepteurs GPS et Galileo et de leurs effets sur la mesure de distance sont les suivants :

- La distance entre un satellite Galileo ou GPS et un récepteur utilisateur est d'environ 20 000 km.

- La vitesse de propagation du signal est de 300 000 km par seconde (vitesse de la lumière), autrement dit :
  - Le signal parcourt les 20 000 km qui le séparent du récepteur en 70 ms (milliseconde), soit 70 parts des 1 000 fractions d'une seconde.
  - Le signal parcourt 1 m en 3 ns (nanoseconde), soit 3 parts du milliard de fractions d'une seconde.

Pour reprendre une dernière fois notre exemple du train, avec un train voyageant à 120 km/h, si l'horloge de Montpellier avance d'une seconde, l'erreur de mesure de la distance est de 33 m. En imaginant un train voyageant à la vitesse de la lumière, l'erreur sur la mesure de distance entre Toulouse et Montpellier serait de 300 000 km…

La précision de positionnement visée par les systèmes Galileo et GPS est de moins de 10 m. Il s'agit donc, pour chaque calcul de positionnement, de synchroniser l'horloge du récepteur et celle du satellite avec une précision de quelques nanosecondes, soit quelques milliardièmes de seconde.

Nous verrons que cette synchronisation est en fait obtenue par le récepteur au cours du même calcul qui lui permet de déterminer sa position.

Synchronisation des satellites et calcul de la position

Une condition essentielle au calcul de la position est la synchronisation des satellites entre eux. Grâce à leurs infrastructures de mesures et de calculs au sol, les systèmes GPS et Galileo garantissent que les horloges des satellites sont très précisément synchronisées entre elles. Les satellites sont de la sorte tous synchronisés par rapport à une référence de temps commune, dite « temps système » (temps GPS, temps Galileo). Ces références de temps sont établies dans les infrastructures de contrôle des systèmes au sol et sont « raccordées » au temps universel, dit UTC (Universal Time Coordinates).

Nous pouvons maintenant revenir sur le calcul de la position par le récepteur. Comme les satellites sont synchronisés entre eux, le récepteur doit déterminer quatre paramètres inconnus :

- Trois paramètres définissant sa position dans l'espace (longitude, latitude, altitude).
- Un paramètre définissant l'avance ou le retard de son horloge par rapport au temps de référence du système qu'il utilise (temps GPS ou temps Galileo).

Un récepteur doit donc recevoir les signaux d'au moins quatre satellites pour établir sa position. Il obtient ainsi quatre mesures de distance lui permettant de calculer ses quatre paramètres inconnus.

La figure 1.3 illustre les relations entre la synchronisation des satellites, les quatre mesures de distance et les quatre paramètres à déterminer par le récepteur de l'utilisateur.

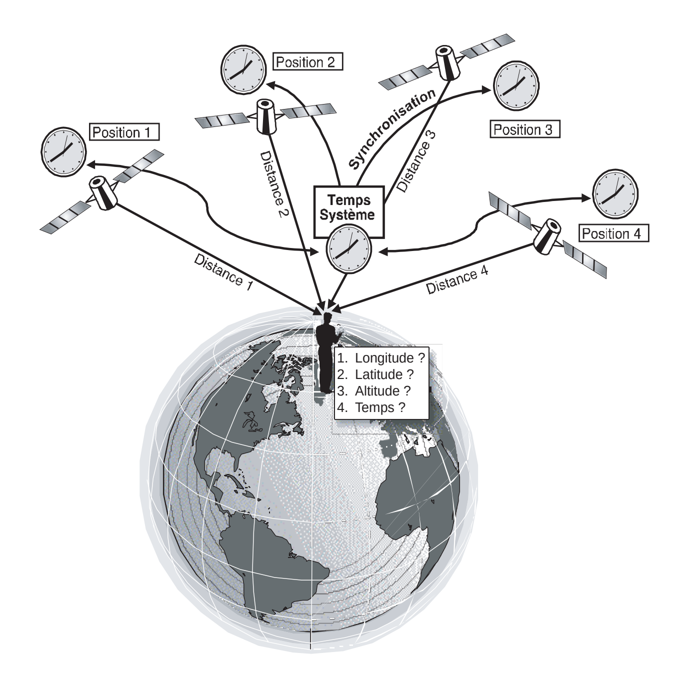


Figure 1.3
Calcul de la position et du temps

Maintenant que nous connaissons le principe de fonctionnement du positionnement par GPS ou Galileo, les propriétés remarquables suivantes sont à noter :

- Le nombre d'utilisateurs du système est illimité (le système n'est jamais saturé).
- Les systèmes GPS et Galileo permettent de se positionner très précisément à la fois dans l'espace (par rapport à un « modèle de référence terrestre ») et dans le temps (par rapport à un « temps de référence »).
- En déployant un nombre suffisant de satellites, le service de positionnement offre une couverture mondiale.
- En optimisant la géométrie de la constellation (nombre et position des satellites en orbite), les performances offertes sont homogènes sur l'ensemble du globe.

Ces propriétés font de Galileo et de GPS des systèmes de navigation dits « globaux », ou GNSS (Global Navigation Satellite System). Cela constitue une rupture technologique

dans tous les domaines d'activité qui exploitent une information de positionnement ou qui peuvent se développer grâce à une information de positionnement globale.

La question de la compatibilité des deux systèmes GPS et Galileo, et en particulier de leurs références de positionnement et de temps, est abordée au chapitre 7. Dès maintenant, nous pouvons comprendre que ces systèmes établissent de fait, grâce aux signaux qu'ils délivrent à tous les usagers et à leur couverture globale, une norme et une référence universelles pour le positionnement dans l'espace et dans le temps.

Les constellations de satellites

Depuis la fin des années 1950, les différentes puissances spatiales ont déployé dans l'espace plusieurs milliers de satellites faisant en permanence le tour de la planète.

Pour comprendre comment évolue un « satellite artificiel », imaginons que nous lancions un objet en direction de l'horizon. Sous l'effet de son poids, ou plus précisément sous l'effet de la force de gravitation terrestre, celui-ci retombe un peu plus loin sur le sol. Si nous le lançons plus fort, il retombe plus loin. Si nous le lançons de plus haut, il retombe également plus loin.

Considérons maintenant la courbure de la surface terrestre, puisque nous sommes à la surface d'une sphère, qui explique que l'horizon se dérobe en permanence quand nous nous déplaçons en ligne droite. Si l'objet est lancé suffisamment fort, la distance dont il tombe après avoir parcouru 10 km correspond à la courbure de la surface du globe sur 10 km. L'objet se trouve en perpétuelle chute vers un sol qui ne cesse de se dérober : on dit que l'objet est « satellisé », ou placé en orbite terrestre.

La figure 1.4 illustre ce principe de mise en orbite des satellites terrestres.

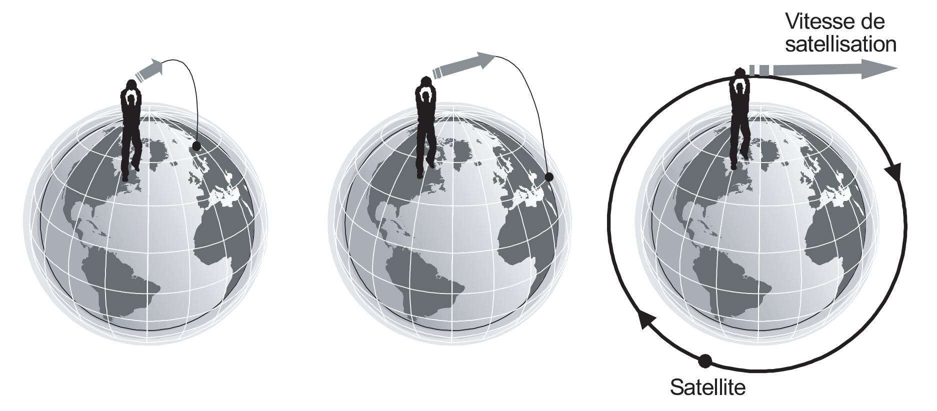


Figure 1.4

Principe de mise en orbite d'un satellite autour de la Terre

La mise en orbite consiste donc avant tout à donner au satellite une vitesse suffisamment importante. Il existe une vitesse minimale de satellisation, qui permet au satellite de compenser la hauteur de sa chute, sur une période donnée, par la courbure de la Terre le long de sa trajectoire sur cette même période. À une altitude nulle (cas théorique), cette vitesse minimale est de 7,9 km/s, soit 25 000 km/h.

De façon plus réaliste, si une fusée lance cet objet depuis une altitude où l'atmosphère terrestre n'est pas susceptible de le freiner, c'est-à-dire supérieure à environ 200 km, et à une vitesse équivalente à 7,9 km/s, alors cet objet se trouve transformé en satellite artificiel de la Terre. Le rôle de la fusée est de donner au satellite de l'altitude, mais aussi et surtout la vitesse horizontale suffisante à sa mise en orbite.

Une fois mis en orbite, le satellite survole la surface terrestre et fait le tour de la planète en permanence. Le temps qu'il met pour faire le tour du globe dépend de son altitude : plus le satellite est bas, plus il tourne vite ; plus il est haut, plus il met de temps.

Voici quelques exemples du temps mis par un satellite à faire le tour de la Terre :

- Satellite d'observation à 800 km d'altitude : fait le tour du globe en une heure quarante environ.
- Satellite de navigation à 20 000 km d'altitude : fait le tour du globe en douze heures environ (douze heures pour le GPS, quatorze heures pour Galileo).
- Satellite géostationnaire à 36 000 km d'altitude : fait le tour du globe en un jour exactement, soit au même rythme que la rotation de la Terre autour d'elle-même.

L'altitude du satellite détermine non seulement la durée nécessaire pour faire un tour complet du globe (la période orbitale), mais aussi la taille de la zone de surface terrestre qu'il couvre. Un satellite géostationnaire (36 000 km d'altitude) offre une couverture permanente sur près d'un tiers de la surface du globe, alors qu'un satellite d'observation en orbite basse à 800 km d'altitude ne couvre qu'une portion d'un continent.

La figure 1.5 illustre les zones de couverture d'un satellite géostationnaire, d'un satellite GPS ou Galileo et d'un satellite en orbite basse. Nous constatons que les satellites GPS et Galileo offrent une couverture presque équivalente aux satellites géostationnaires, alors qu'ils sont à une altitude presque deux fois moins importante. La raison à cela est que si la zone de couverture varie beaucoup en fonction de l'altitude pour les orbites basses, en s'éloignant de la Terre, elle n'augmente que très peu avec l'altitude.

Considérons maintenant le point de vue de l'utilisateur qui observe un satellite. La vitesse du satellite autour de la Terre combinée à la vitesse de rotation de la Terre d'un tour par jour autour d'elle-même et à la zone qu'il couvre déterminent le temps maximal pendant lequel le satellite reste visible de l'utilisateur. C'est le temps dit « de visibilité ».

Ce temps peut varier de l'ordre de dix minutes pour les satellites en orbite basse à plus de quatre heures pour un satellite GPS ou Galileo, et jusqu'à une visibilité permanente pour un satellite géostationnaire.

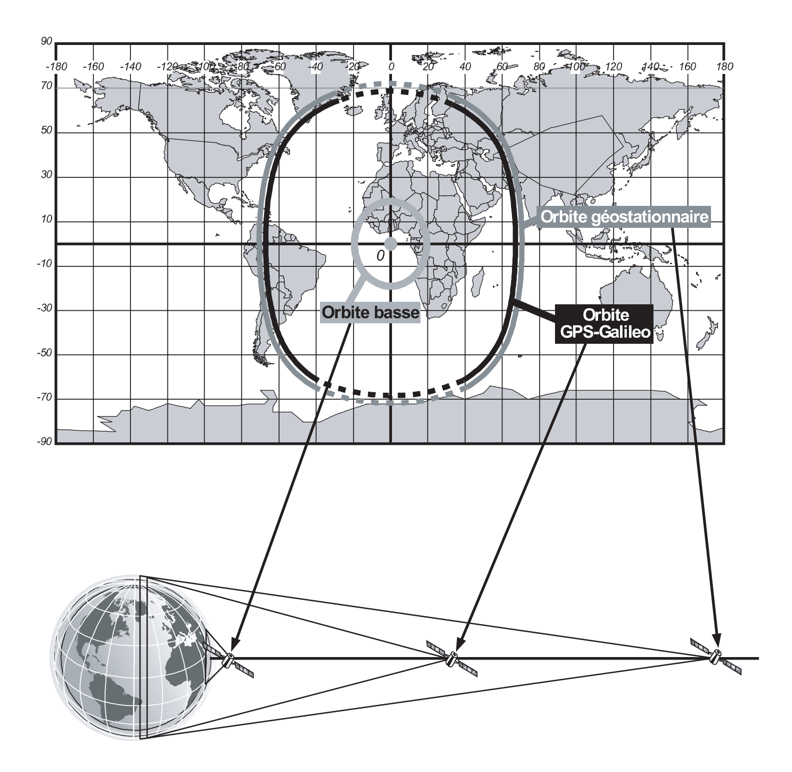


Figure 1.5
Exemples de zones géographiques couvertes par les satellites

Un satellite seul ne peut donc couvrir en permanence qu'une partie du globe, alors que certaines applications, comme les télécommunications ou l'observation de la Terre, ont des exigences de couverture mondiale et quasi permanente.

Les constellations de satellites sont apparues pour répondre aux besoins grandissant des applications spatiales. Ainsi, des constellations de satellites de télécommunications géostationnaires à 36 000 km d'altitude (trois satellites couvrant l'ensemble du globe, à l'exception des très hautes latitudes) et de satellites d'observation ou de télécommunications en orbite basse (aux environs de 1 000 km d'altitude) ont vu le jour.

La constellation de satellites GPS est une des plus importantes des constellations jamais mises en orbite. Elle est constituée de 24 satellites en orbite à environ 20 200 km d'altitude. Pour ce qui est de Galileo, la constellation sera déployée à 23 200 km d'altitude et comprendra un total de 30 satellites.

Les caractéristiques des constellations GPS et Galileo sont un aspect essentiel de la conception de ces systèmes. Parmi les nombreux critères qui entrent en jeu, les suivants sont les plus importants et ont conduit aux choix des paramètres de ces constellations (les

caractéristiques plus précises des constellations GPS et Galileo sont détaillées dans les chapitres suivants) :

- Altitude des satellites (20 200 km pour GPS et 23 200 km pour Galileo) : comme nous l'avons vu, l'altitude des satellites détermine directement la zone couverte et la durée de visibilité d'un satellite depuis un utilisateur au sol. Dans le cas de GPS et de Galileo, le choix d'une altitude trop basse nécessiterait de déployer un nombre trop important de satellites pour couvrir l'ensemble du globe par au moins quatre satellites en permanence. Une altitude trop élevée entraînerait pour sa part une augmentation de la puissance et de la masse des satellites, pour un très faible gain en zone de couverture, comme l'illustre la figure 1.5.
- Nombre de satellites (24 pour GPS, 30 pour Galileo) : il est déterminé de façon à assurer la performance recherchée sur l'ensemble du globe. Au moins quatre satellites doivent être visibles de tout point du globe pour fournir un service de positionnement. Un nombre plus important de satellites offre de meilleures performances, en particulier dans les zones urbaines, où certains satellites peuvent être masqués par des immeubles.
- Inclinaison du plan des orbites par rapport à l'équateur : ce paramètre influence directement la visibilité par les usagers des hautes latitudes. Les satellites GPS décrivent une orbite inclinée de 55° par rapport à l'équateur et les satellites Galileo de 56° (Galileo offre donc une couverture légèrement meilleure aux latitudes élevées).

  La figure 1.6 illustre ce paramètre sur une orbite inclinée.

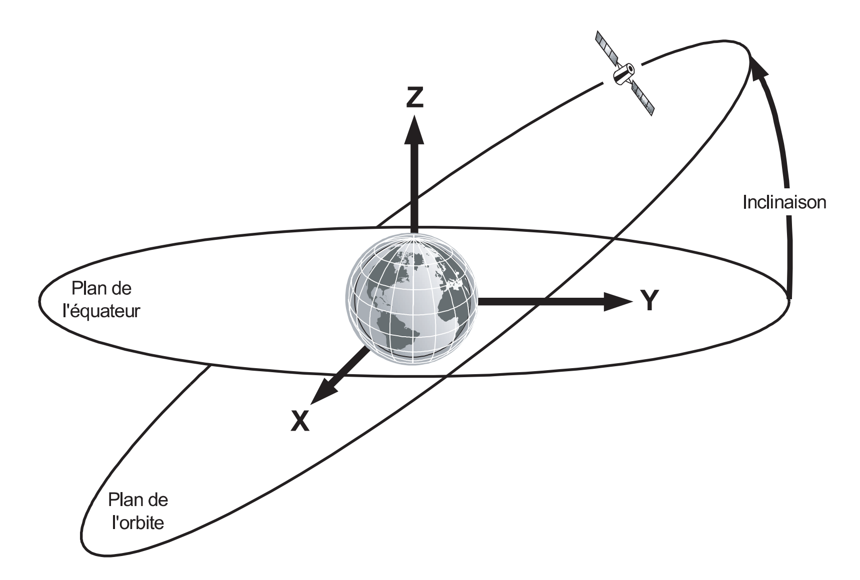


Figure 1.6

Inclinaison de l'orbite des satellites

- Répartition des satellites dans l'espace : influence directement les performances du service mais également le nombre de lancements nécessaires au déploiement puis au remplacement des satellites. Les satellites sont disposés dans différents plans orbitaux (6 plans orbitaux de 4 satellites pour le GPS, 3 plans orbitaux de 10 satellites pour Galileo), autorisant le lancement de multiples satellites dans un plan avec un seul lanceur.

La figure 1.7 illustre la répartition dans l'espace des satellites de la constellation Galileo.

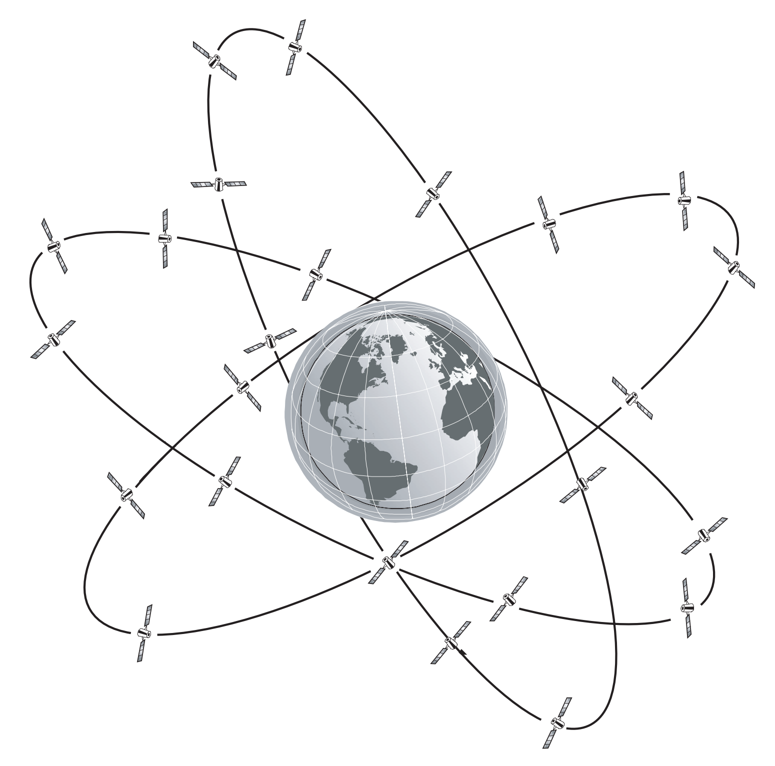


Figure 1.7
La constellation Galileo

Une constellation de satellites peut donc être définie comme un ensemble de satellites évoluant dans l'espace avec une disposition bien déterminée. C'est ce qu'on appelle la « géométrie » de la constellation.

La mise en place de la constellation demande un soin particulier pour obtenir un positionnement initial des satellites (à la fin du lancement) en conformité avec les caractéristiques précises de la géométrie de la constellation.

Pendant toute la durée où le service de positionnement est fourni, le maintien de cette géométrie demande un contrôle permanent de l'état des satellites, lesquels peuvent tomber en panne, sans compter que leur durée de vie est limitée. C'est le rôle des opérateurs du système depuis les centres de contrôle au sol que d'effectuer ces contrôles.

Signal et mesure de distance

Les satellites GPS et Galileo émettent des signaux générés à partir de leurs émetteurs embarqués. Ces signaux sont de même nature que les ondes hertziennes de diffusion radio AM/FM ou TV, les signaux radars ou la lumière : il s'agit d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière.

Nous pouvons nous représenter la propagation de ces ondes dans l'espace depuis le satellite comme de petites vagues à la surface de l'eau.

L'onde électromagnétique peut être caractérisée indifféremment par l'un ou l'autre des paramètres suivants :

- Sa fréquence (mesurée en hertz), qui représente le nombre d'oscillations mesurées en un point fixe pendant une seconde.
- Sa longueur d'onde (mesurée en mètre), qui représente la distance entre deux crêtes successives de l'ondulation.

Les signaux électromagnétiques sont généralement caractérisés et référencés par la fréquence qu'ils utilisent. C'est ainsi qu'une radio AM ou FM est caractérisée par sa fréquence d'émission. Il est important de contrôler et réguler l'ensemble des émissions d'ondes électromagnétiques, car l'émission de plusieurs ondes sur des fréquences proches a pour effet de perturber leur propagation, les ondes interférant les unes avec les autres et perdant leurs caractéristiques de base.

C'est pourquoi les différents émetteurs de signaux électromagnétiques se voient attribuer des fréquences bien précises par les autorités nationales de régulation.

Il en va de même pour les systèmes spatiaux. Compte tenu de leur couverture mondiale, les fréquences qu'ils utilisent sont déterminées par les autorités mondiales de régulation des télécommunications. Certaines fréquences sont réservées aux systèmes de navigation par satellites comme GPS et Galileo. Elles se situent dans la bande de fréquences dite UHF (Ultra-High Frequency), et plus particulièrement dans la bande dite « L ». Il s'agit de fréquences plus élevées que celles utilisées par les radios FM (situées autour de 100 MHz) et les émetteurs de diffusion TV, mais moins élevées que les fréquences radar.

La figure 1.8 illustre la position des fréquences GPS et Galileo parmi les différentes familles de fréquences référencées.

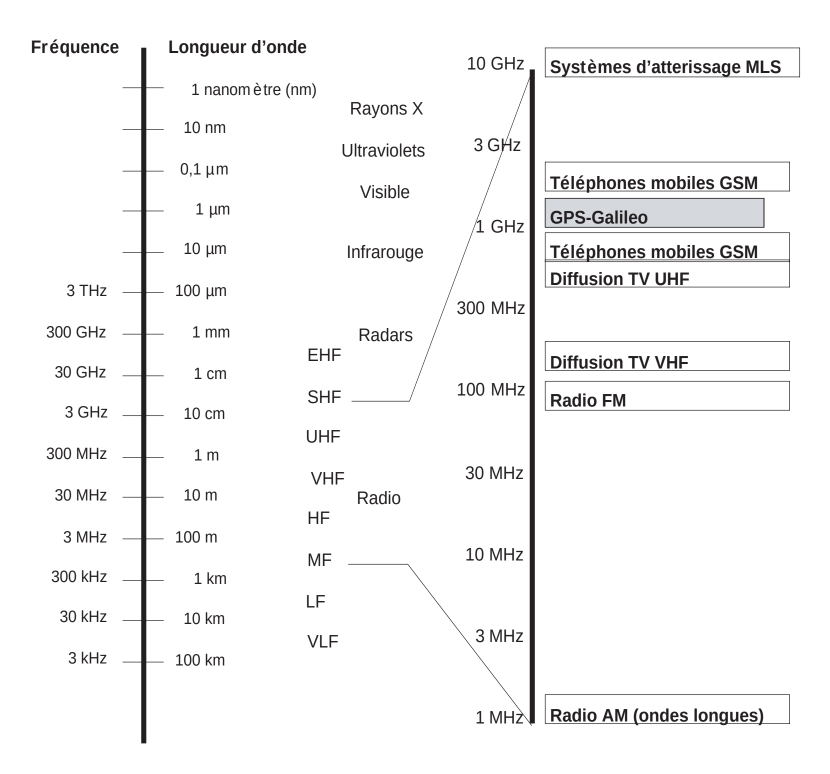


Figure 1.8

Fréquences utilisées par le GPS et Galileo

Modulation des signaux GPS et Galileo

Chaque satellite GPS transmet trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes :

- L1 : 1 575,42 MHz
- L2 : 1 227,60 MHz
- L5 : 1 176,45 MHz

Chaque satellite Galileo transmet également trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes :

- L1 : 1 575,42 MHz
- E6 : 1 278,75 MHz
- E5 : 1 191,795 MHz

Chacun de ces signaux est construit à partir d'un signal dit « de base », aussi appelé « porteuse ». Il s'agit d'une onde pure de fréquence égale à environ 1 500 MHz. Cela représente un nombre d'un milliard cinq cents millions d'oscillations électromagnétiques par seconde. La longueur d'onde de cette porteuse est d'environ 20 cm.

La figure 1.9 illustre cette onde porteuse.

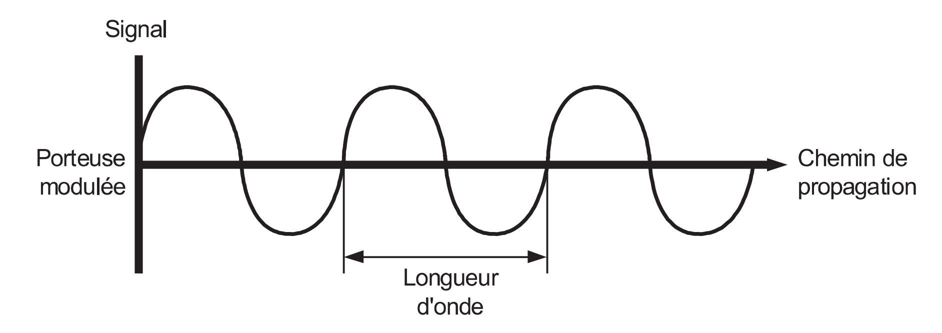


Figure 1.9

Onde porteuse des signaux GPS et Galileo

Un tel signal permet d'établir un lien entre chaque satellite — qui émet son signal à partir d'une source oscillante — et l'ensemble des récepteurs qui captent cette onde quand ils écoutent cette fréquence particulière.

Cependant, ce lien seul ne permet ni de transmettre une information de temps (le « bip » que nous avons décrit précédemment et qui permet au récepteur de réaliser sa mesure de distance au satellite), ni de transmettre les informations nécessaires au récepteur pour calculer sa position et la position du satellite.

Pour transmettre une information à travers ce signal, il faut donc ajouter d'autres signes. Ces signes sont des modifications du signal de base, appelées « modulations ». Ces modulations peuvent être observées par le récepteur et être utilisées pour transporter de l'information entre le satellite et les récepteurs.

Il existe différents types de modulations. On peut, par exemple, modifier la fréquence, en augmentant ou diminuant le nombre d'oscillations par seconde. C'est ce qu'on appelle la « modulation de fréquence », une technique utilisée par les radios FM (Frequency Modulation). Dans ce cas, l'émetteur module (modifie) la fréquence de l'onde porteuse de base en fonction de l'information qu'il veut transmettre. De son côté, le récepteur détecte ces variations de fréquences et peut ainsi restituer l'information transmise par l'émetteur. Il est aussi possible de modifier l'amplitude de l'onde porteuse. C'est ce qu'on appelle la modulation d'amplitude, utilisée par les radios AM (Amplitude Modulation).

Les satellites GPS et Galileo utilisent pour leur part la « modulation de phase » pour transmettre leurs informations. L'émetteur transmet son information sans changer la fréquence, mais en introduisant des sauts dans les oscillations de l'onde. Le récepteur peut détecter ces sauts et recomposer l'information de l'émetteur.

Le type d'information qui peut être transmis par un saut de phase est très élémentaire. Par exemple, la présence d'un saut indique une information « 1 », et l'absence de saut une information « 0 ». On peut donc transmettre une information binaire, ou digitale (le « digit » vaut 0 ou 1), qui est la forme sous laquelle toutes les informations sont stockées dans les mémoires informatiques.

En résumé :

- Le satellite établit un lien avec chaque récepteur en transmettant une onde pure (la porteuse) à une fréquence bien précise, captée et reconnue par chaque récepteur.
- Le satellite mémorise des informations sous forme binaire (des 0 et des 1) et les transmet à tous les utilisateurs en modulant la porteuse par des sauts de phase.
- Chaque récepteur détecte ces sauts et peut ainsi reconstituer l'information sous forme également binaire.

La figure 1.10 illustre le principe de transmission des données binaires par utilisation de la modulation de phase.

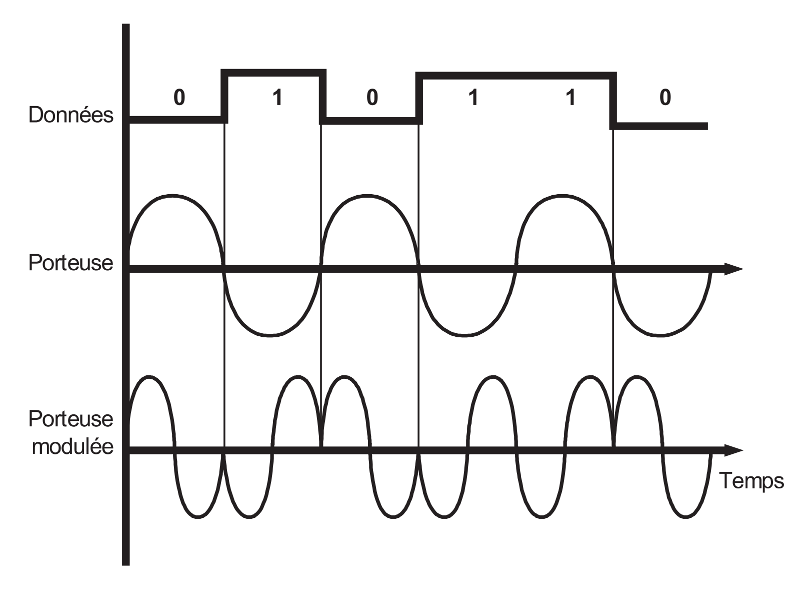


Figure 1.10

La modulation de phase

Étant de conception plus récente que le GPS, Galileo a pu bénéficier de techniques de modulation plus modernes. Appelées BOC (Binary Offset Carrier) ces modulations utilisent également les sauts de phase, mais avec un nombre plus grand d'états possibles de la phase et des sauts associés.

Maintenant que nous avons vu comment un satellite pouvait transmettre de l'information aux récepteurs des usagers, rappelons-nous que chaque récepteur doit recevoir les signaux d'au moins quatre satellites simultanément, chacun d'eux utilisant la même fréquence. Comment dès lors garantir que les récepteurs accèdent à ces signaux multiples sans interférer entre eux ? C'est le rôle du code des signaux GPS ou Galileo.

Code des signaux GPS et Galileo

Puisque chaque récepteur reçoit en même temps, sur une même fréquence, plusieurs signaux provenant de plusieurs satellites, il lui faut un moyen pour reconnaître et différencier chaque signal. La technique utilisée pour cela par le GPS et par Galileo est appelée CDMA (Code Division Multiple Access), ou accès multiple par division de code.

Dans le CDMA, chaque satellite se voit attribuer un code particulier, qu'il utilise pour moduler son signal. Ces codes ne sont en fait que des séquences de bits, 0 et 1, qui peuvent être générées de façon prédéterminée et indépendante par les satellites GPS et Galileo et par chaque récepteur. Les récepteurs, qui connaissent également ces codes, peuvent les identifier et séparer les différents signaux arrivant sur la même bande de fréquences.

Ces codes sont caractérisés par leur taux, c'est-à-dire le nombre de bits transmis par seconde, et leur longueur, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle le code reprend une nouvelle séquence.

Un autre avantage apporté par ces codes est qu'il est possible d'en contrôler l'accès par les utilisateurs, ce qui permet de développer des applications de type militaire, par exemple le service PPS (Precise Positioning Service) du GPS, dont le code est réservé aux utilisateurs habilités, et des applications de type commercial (le service commercial de Galileo est situé sur la fréquence E6 et utilisera un code dont l'accès sera contrôlé). Seuls les usagers habilités ou abonnés ont accès à une « clé » permettant de générer le code à l'identique du satellite et donc de « décoder » le signal.

Ainsi, les signaux GPS ont plusieurs codes :

- Le code dit C/A (Clear Access), en libre accès. Émis à une fréquence de 1,023 million de bits, ou chips, par seconde, il a une longueur de 1 milliseconde. Cela signifie qu'en une seconde, le satellite transmet 1 000 séquences de code complètes.

- Le code dit P (Precision), réservé aux forces armées américaines, qui permet d'accéder aux meilleures performances du GPS. Émis à une fréquence dix fois plus élevée que le code C/A, il nécessite une semaine pour la transmission de la séquence complète du code.

Les signaux Galileo sont également conçus pour avoir plusieurs codes *(voir le chapitre 5 pour leur présentation détaillée) :*

- Les codes en accès libre, qui ont des caractéristiques semblables au code C/A du GPS mais utilisent des techniques de modulation plus modernes.
- Le code PRS (Public Regulated Service), réservé aux applications gouvernementales et militaires.
- Le code CS (Commercial Service), réservé aux applications commerciales à accès restreint (payant).

Ces codes modifient le signal de la porteuse en y introduisant des sauts de phase. Dans le cas du code C/A du GPS, ces sauts peuvent être introduits environ tous les millioniémes de seconde. Cela représente un saut pour environ 1 500 oscillations de la porteuse.

La figure 1.11 illustre comment le code GPS C/A est introduit sous forme de modulation de la porteuse L1 du GPS.

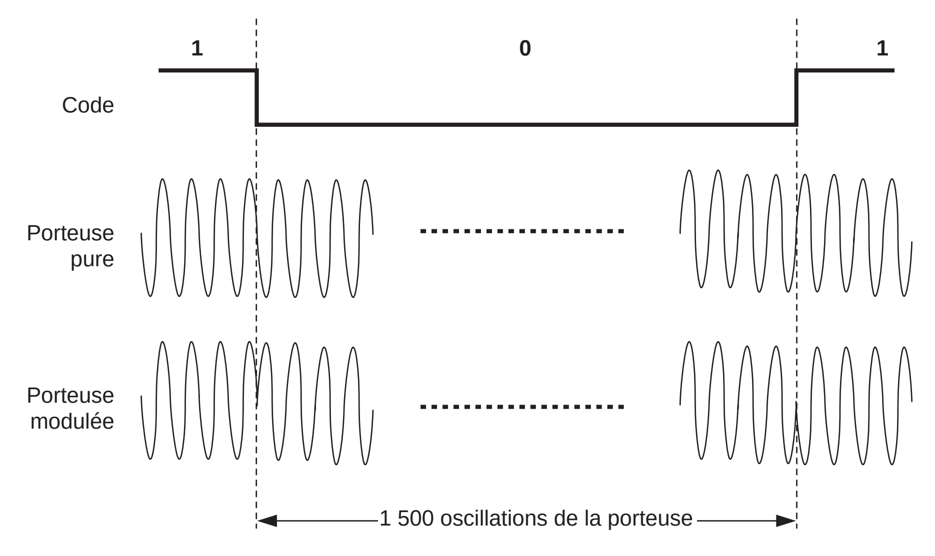


Figure 1.11

Modulation de la porteuse par le code GPS C/A

Les systèmes GPS et Galileo associent un code différent pour chaque satellite. Le récepteur, qui connaît le code de chacun de ces satellites, peut séparer les signaux qu'il reçoit en reconnaissant leurs codes. Cela fait partie de la fonction de corrélation du récepteur, aussi appelé corrélateur.

Maintenant que nous avons résolu le problème de la réception de multiples signaux provenant de plusieurs satellites, nous pouvons revenir sur le principe de fonctionnement de la navigation par satellite. Chaque récepteur doit trouver dans le signal des repères lui permettant de mesurer le temps de propagation de ce signal entre le satellite et le récepteur et ainsi de calculer la distance qui le sépare du satellite. C'est la mesure de distance, ou *ranging.*

Mesure de distance (ranging)

Outre qu'il permet au récepteur de recevoir les signaux de plusieurs satellites en même temps, le code GPS ou Galileo peut être utilisé comme repère, afin de permettre au récepteur de mesurer le temps de propagation du signal.

Les satellites synchronisent très précisément le début d'une seconde (donnée par leur horloge) avec le début d'une séquence de code (transmise dans leur signal). Le récepteur, qui a la possibilité de repérer le début de cette séquence de code lorsqu'il reçoit le signal, peut dès lors mesurer l'instant d'arrivée de ce repère par rapport à son horloge locale.

Pour cela, il génère la même séquence de code que le satellite et cherche à synchroniser le signal qu'il reçoit avec le signal qu'il génère lui-même. Lorsque les deux signaux sont synchronisés, ou corrélés, le récepteur détecte le signal reçu et connaît l'instant où le début de la séquence lui est parvenu. C'est ce qu'on appelle l'opération de corrélation du code.

La figure 1.12 illustre le processus de corrélation, faisant apparaître un pic de corrélation lorsque le code généré par le récepteur se synchronise avec le code reçu en provenance du satellite.

La précision de cette mesure dépend de celle avec laquelle le récepteur peut mesurer l'instant de réception du début de la séquence de code. Cette précision dépend en premier lieu de la puissance du signal reçu et des interférences causées par d'autres signaux sur ces mêmes fréquences. En conditions normales, la précision de la mesure correspond à une erreur de distance inférieure à 1 m.

Nous en avons maintenant presque fini avec l'étude du signal GPS et Galileo. Nous avons vu comment le récepteur pouvait réaliser une mesure de distance à l'aide du

code GPS ou Galileo. Il nous reste à voir comment le récepteur peut obtenir les données, par exemple, la position du satellite, à travers le signal reçu.

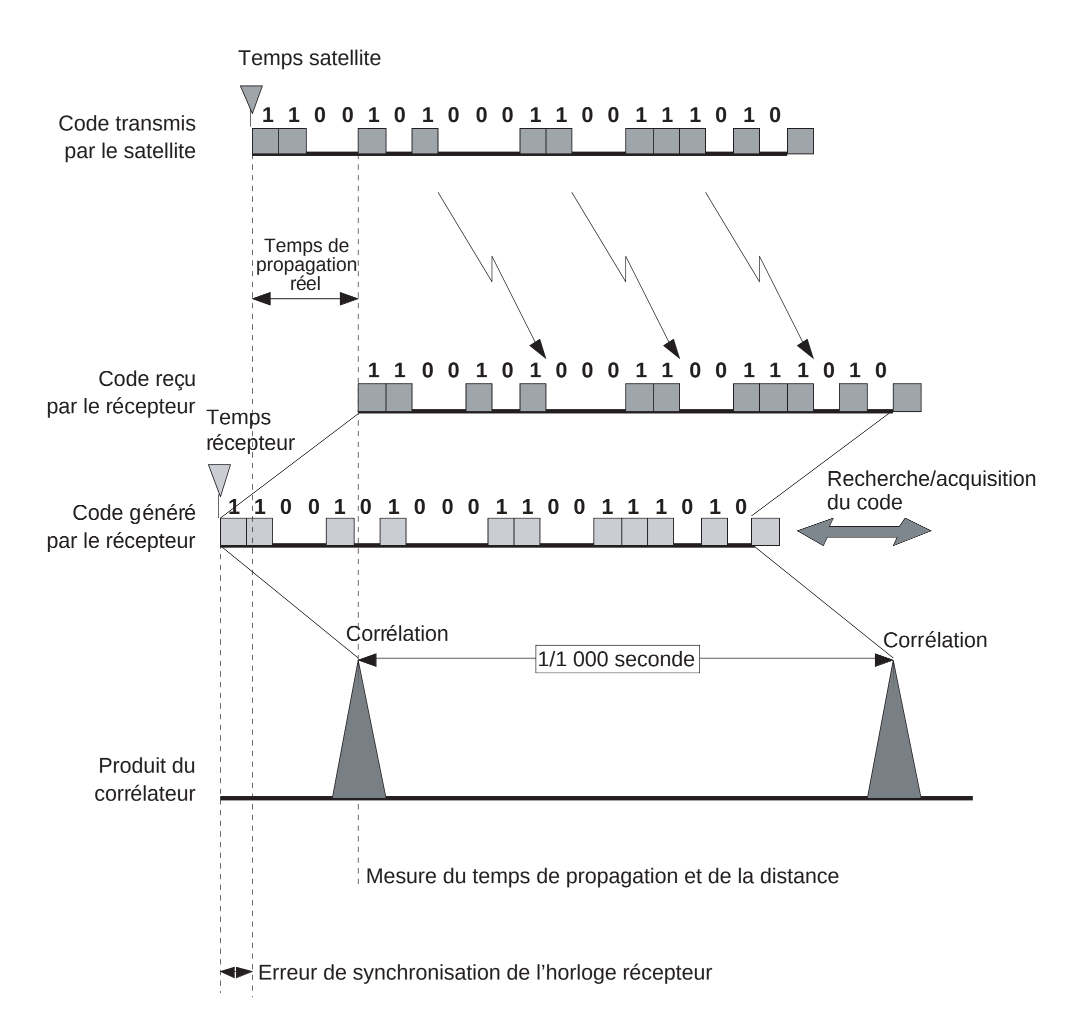


Figure 1.12

Corrélation du code pour GPS C/A

Les messages GPS et Galileo

Les messages GPS et Galileo contiennent des données bien définies, qui sont nécessaires aux récepteurs pour effectuer leur calcul de position. Ces données sont calculées dans les centres de contrôle au sol de GPS et de Galileo puis sont transmises au moins quotidiennement aux satellites lorsque ceux-ci sont en communication avec une station sol de transmission. Chaque satellite enregistre ces données à bord et les intègre dans les signaux qu'il transmet aux récepteurs.

Ces données comportent notamment les éléments suivants :

- **Almanachs.** Donnent les positions de tous les satellites de la constellation, sur plusieurs semaines, avec une précision de l'ordre de 1 km. Chaque satellite diffuse les almanachs concernant tous les satellites. Dès la réception du message d'un seul satellite, un récepteur peut obtenir les informations de position et d'état de l'ensemble de la constellation. La précision de ces almanachs est suffisante pour qu'un récepteur (connaissant approximativement sa position) sache quels satellites sont en vue et accélère ainsi sa recherche des signaux provenant des autres satellites et l'établissement de sa première position précise.

- **Éphémérides.** Donnent des informations sur la position des satellites, avec une précision de l'ordre de 1 à 10 m. Chaque satellite diffuse uniquement les éphémérides qui le concernent.

- **Corrections d'horloge.** Donnent l'écart (avance ou retard) de l'horloge du satellite par rapport au temps système GPS ou Galileo. On a vu que ces données permettaient également au récepteur de synchroniser son horloge par rapport au temps GPS ou Galileo, au travers du calcul de positionnement.

- **Paramètres de correction ionosphérique.** Nous verrons dans les sections suivantes que les hautes couches de l'atmosphère terrestre, qui constituent l'ionosphère, perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo. Ces perturbations dégradent la précision de la mesure de distance. Afin de corriger partiellement cette dégradation, des paramètres de correction ionosphérique sont transmis par les satellites eux-mêmes et appliqués par les récepteurs lors de leur calcul de position.

Toutes ces données sont transmises selon un format et une séquence bien définis et standardisés. La définition de cette séquence et des fréquences de répétition de chaque message a été optimisée lors de la conception des systèmes afin de minimiser le temps de démarrage des récepteurs et d'assurer la continuité de la fourniture d'une position en cas de perte de messages (par exemple, lorsque le récepteur se trouve temporairement masqué).

La diffusion de ces informations est réalisée à un débit extrêmement faible, de l'ordre de 50 bit/s pour GPS C/A et jusqu'à 125 bit/s pour Galileo. Le débit de 50 bit/s est

équivalent à la transmission de 7 caractères ASCII, autrement dit de 7 pressions de touches d'un clavier d'ordinateur, par seconde. Ce débit est 1 000 fois plus faible que celui d'une ligne téléphonique numérique classique.

Il faut environ douze minutes pour recevoir l'ensemble des données GPS (éphémérides, corrections d'horloge, almanachs et corrections ionosphériques), et cinq minutes pour celles transmises par les satellites Galileo.

Ces messages sont numérisés, c'est-à-dire qu'ils se présentent sous la forme d'une séquence binaire de 0 et de 1, avec 50 valeurs par seconde, soit une valeur 0 ou 1 toutes les 20 ms, pour les messages GPS C/A.

Afin d'être incluses dans le signal des satellites, ces séquences binaires des messages sont superposées aux séquences binaires des codes GPS ou Galileo. Cette superposition consiste à inverser les 0 et les 1 du code quand le bit du message vaut 1 et à ne pas les modifier quand le bit du message vaut 0.

La figure 1.13 donne un exemple de superposition d'une séquence de données avec une séquence de code.

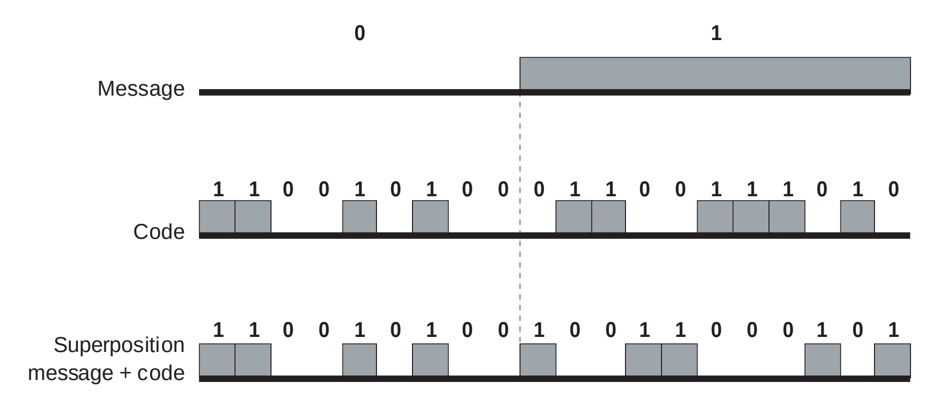


Figure 1.13

Superposition du message et du code pour GPS C/A

Dans le cas du signal GPS C/A, le code se présente sous la forme de séquences binaires de 0 et 1, avec 1 million de valeurs par seconde. Une séquence de code « à accès libre » dure environ 1 ms. On cherche donc à transmettre un bit de message de navigation en même temps que 20 séquences complètes de code, soit en même temps que 20 000 bits de code.

Le récepteur peut aisément déterminer toutes les 20 séquences de code quel bit de message a été superposé.

La figure 1.14 illustre comment sont intégrés les messages, le code et la porteuse dans les signaux C/A diffusés par les satellites GPS.

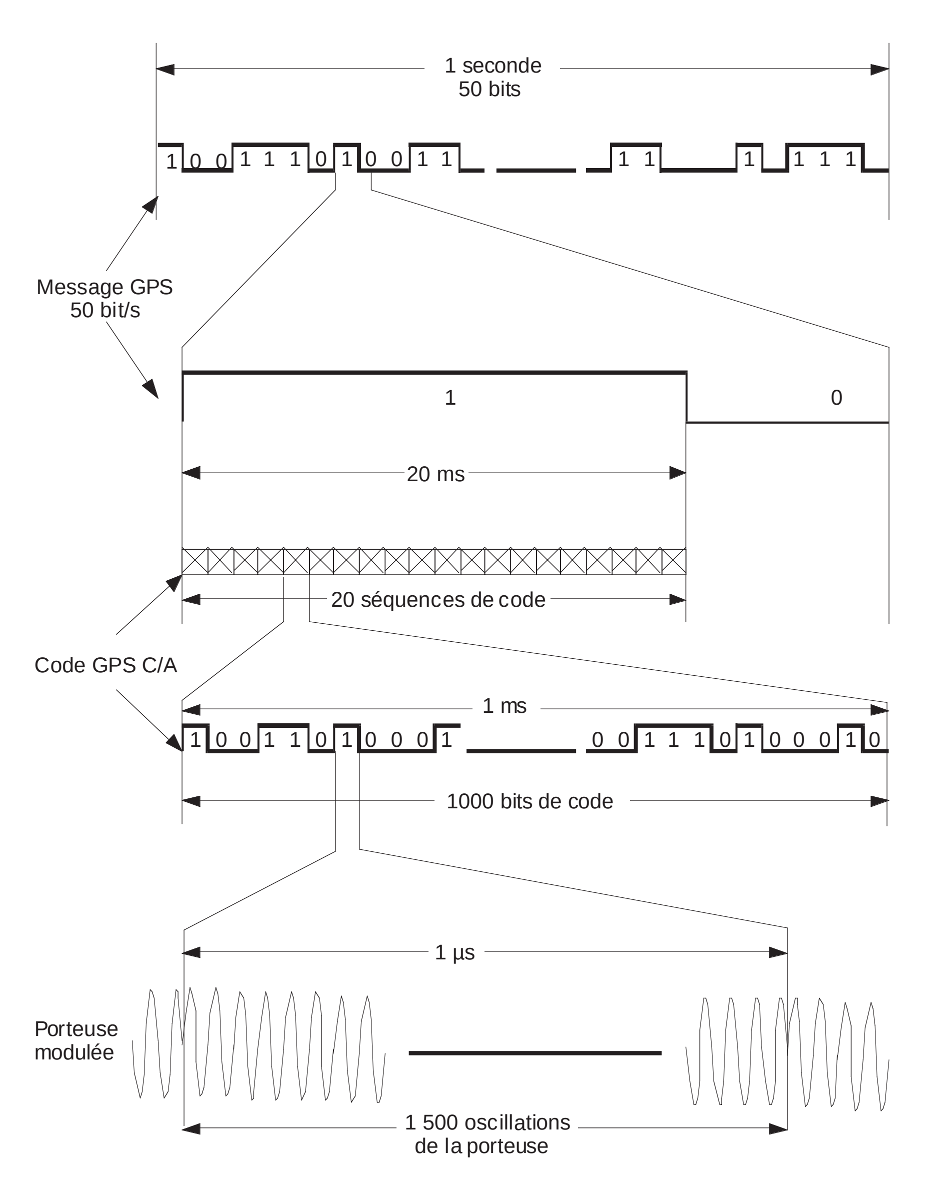


Figure 1.14

Relations entre la porteuse, le code et le message pour GPS C/A

Une fois superposées, ces séquences binaires de code et de message de navigation sont utilisées par le satellite pour moduler le signal de la porteuse, ce qui permet de transmettre l'ensemble des informations à tous les récepteurs en visibilité.

Performances et sources d'erreur

L'intérêt grandissant pour les applications fondées sur le GPS et Galileo est très fortement lié à la qualité du service de positionnement offert par ces systèmes. Cette qualité de service s'exprime sous la forme d'un ensemble de paramètres, qui caractérisent les performances offertes aux usagers.

Plusieurs phénomènes physiques et facteurs techniques ont un effet sur ces performances. Nous présentons dans ce chapitre les différentes sources d'erreur qui déterminent la précision du positionnement et de la synchronisation des récepteurs.

Les performances

La performance du service de positionnement est un élément primordial pour l'ensemble des applications utilisant le GPS et Galileo. En effet, le champ des applications possibles est très variable selon les performances offertes et garanties. De plus, le type de performance recherché est très variable en fonction des applications. Ainsi, les applications de transport, par exemple aérien ou maritime, pour lesquelles des vies sont en jeu, exigent une précision instantanée, de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres, mais aussi et surtout une fiabilité à toute épreuve. À l'inverse, les applications scientifiques ou géodésiques utilisent des récepteurs statiques et peuvent recourir à des calculs de moyennes ou de comparaisons sur des durées importantes pour obtenir des précisions de l'ordre de quelques centimètres.

Afin de caractériser les performances des systèmes de navigation pour cet ensemble très varié d'applications, il faut recourir à plusieurs paramètres, dont nous présentons ci-après les principaux.

La précision de service

La précision de service caractérise l'écart entre la position donnée par un récepteur GPS ou Galileo et sa vraie position. C'est la performance la plus communément considérée par les utilisateurs.

On distingue généralement :

- La précision de positionnement horizontale, qui est, par exemple, directement associée à l'erreur de positionnement sur une carte.

- La précision de positionnement verticale, qui est essentielle, par exemple, à la navigation aérienne.
- La précision temporelle, c'est-à-dire la précision avec laquelle le temps de référence GPS ou Galileo est restitué à l'utilisateur par le récepteur.

La précision de positionnement varie d'un instant à un autre en fonction des variations des différentes sources d'erreur, comme nous le verrons un peu plus loin dans ce chapitre. C'est pour cela que la précision de positionnement doit être exprimée de façon statistique, c'est-à-dire en analysant un grand nombre de positions successives fournies par un récepteur.

Prenons l'exemple d'un récepteur classique donnant à l'usager une position toutes les secondes et restant immobile pendant 100 s. Nous pouvons tracer sur une carte l'ensemble des positions fournies par le récepteur durant ces 100 s, ce qui ressemble à un nuage de points.

La figure 1.15 donne un exemple théorique de nuage de points et de paramètres de précision associés.

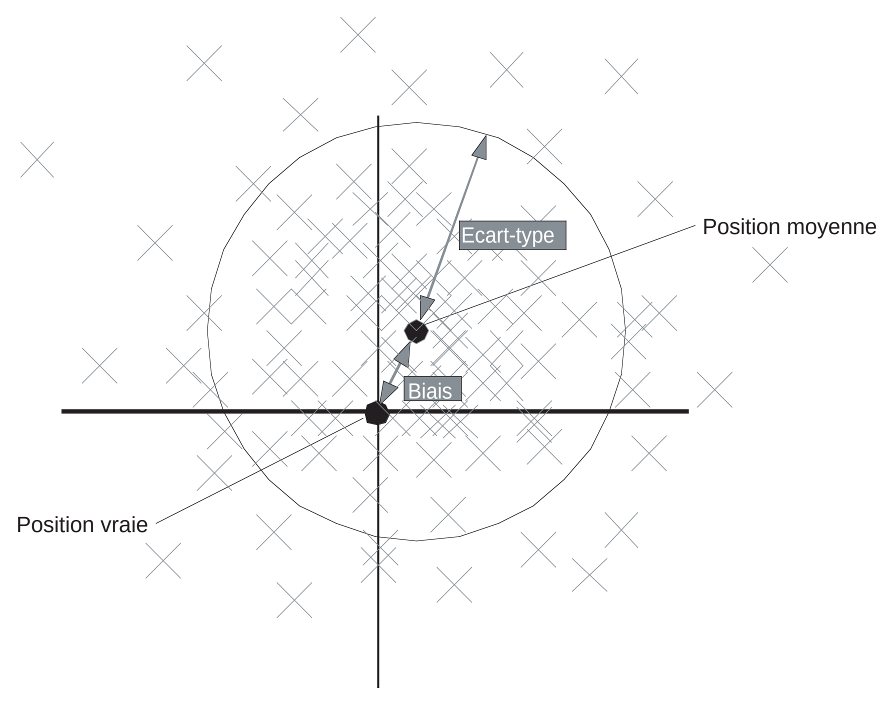


Figure 1.15

Précision du positionnement horizontal

À partir de ce nuage de points, nous pouvons déterminer :

- Une position moyenne (le centre du nuage de points). On appelle « biais de positionnement » l'écart entre cette position moyenne et la position vraie.
- La dispersion du nuage de points par rapport à cette position moyenne. Cette dispersion peut se caractériser par la valeur de « l'écart type », représenté par la lettre σ. Plus la dispersion du nuage de points est importante, c'est-à-dire plus la variation de l'erreur de positionnement d'un instant à un autre est importante, plus l'écart type est important.

Nous pouvons caractériser la précision de positionnement par le biais et par l'écart type. Nous pouvons également caractériser la précision de positionnement par une mesure de la dispersion du nuage de points par rapport à la position vraie, l'écart type se calculant par rapport à la position moyenne.

Nous utilisons pour cela un calcul donnant une valeur statistique RMS (Root Mean Square), qui caractérise la dispersion de positionnement en incluant la valeur du biais.

Généralement, la valeur du biais des systèmes GPS et Galileo est beaucoup plus faible que celle de l'écart type. Nous caractérisons donc la précision de positionnement par la valeur de l'écart type ou par la valeur RMS, qui sont sensiblement égales.

Les précisions RMS horizontales offertes par les systèmes de navigation par satellite peuvent aller typiquement d'une valeur de l'ordre de 1 à 2 m — en utilisant, par exemple, des systèmes d'augmentation de performances régionaux, comme EGNOS — à des valeurs dégradées de l'ordre de 100 m — cas du GPS lorsque le DOD (Department of Defense) américain active le dispositif de dégradation volontaire, dit SA (Selective Availability).

Intégrité et continuité du service

Les systèmes de navigation sont utilisés pour des applications dans lesquelles la sécurité des personnes est engagée. C'est le cas notamment des équipements et services de transport aérien, maritime ou ferroviaire. Ces utilisateurs ont un besoin impératif d'informations de positionnement précises et fiables.

Cette fiabilité se caractérise par les deux types de performances suivantes :

- **Intégrité.** L'usager a besoin d'une garantie que l'information de positionnement estimée par son récepteur est bonne et qu'aucune erreur ne s'est glissée dans le système au point de dégrader la précision de positionnement au-delà d'une certaine

tolérance sans qu'il en ait été averti. Cette garantie de la précision du positionnement est appelée *intégrité du service.* On imagine aisément les conséquences d'une erreur de positionnement sur l'atterrissage automatique d'un avion si cette erreur devait rester non détectée.

- **Continuité.** Lorsque l'usager s'engage dans une opération de transport pour laquelle il utilise le positionnement GPS ou Galileo comme moyen de navigation — par exemple, un avion en phase d'atterrissage automatique, ou un bateau engagé dans une opération d'accostage assistée par navigation automatique —, il lui faut une assurance que ce service de positionnement ne sera pas interrompu avant la fin de son opération. Cette capacité du système de navigation à maintenir le service de positionnement sans interruption pendant une période donnée est appelée *continuité du service.* On imagine là encore aisément les difficultés qui pourraient survenir en cas d'interruption du service de navigation pour un avion en phase d'atterrissage automatique.

L'intégrité et la continuité du service sont donc des performances essentielles attendues des systèmes GPS et Galileo par les applications pour lesquelles la sécurité des personnes ou des produits est engagée.

Ces performances peuvent également être exprimées par des valeurs statistiques. Ainsi, l'intégrité s'exprime sous la forme d'une probabilité d'erreur du système sur une période donnée. Les performances ultimes recherchées par les systèmes de navigation par satellite sont de l'ordre d'une chance sur dix millions d'avoir une erreur du système sur une période d'une heure.

La continuité peut être exprimée par la probabilité d'interruption du service de positionnement sur une période donnée. Les performances ultimes recherchées par les systèmes de navigation par satellite sont de l'ordre d'une chance sur cent mille d'avoir une interruption du service sur une période de deux minutes trente (durée typique d'un atterrissage). Notons que les interruptions de service volontaires, planifiées, et pour lesquelles les usagers sont informés suffisamment à l'avance, ne sont pas considérées comme des pertes de performance de continuité du service.

La disponibilité du service

Les services de navigation globaux tels que le GPS et Galileo doivent pouvoir être disponibles en tout lieu et à tout instant, à la demande de l'utilisateur. Or certains événements ou conditions spécifiques de l'environnement de l'utilisateur peuvent conduire à une indisponibilité du service. Des opérations inopinées de maintenance sur les satellites pourraient, par exemple, conduire à une perte de précision, voire à une perte de service. Ou encore, un utilisateur ayant des satellites masqués, par exemple,

par des immeubles, pourrait perdre la disponibilité du service pendant la durée de ces masquages.

La performance de disponibilité établit, là encore de façon statistique, la probabilité en un lieu donné d'avoir accès au service de positionnement.

Cette performance est une caractéristique essentielle de la valeur économique des services offerts par le GPS et Galileo. Un utilisateur ne peut être satisfait de l'achat d'un produit de navigation globale que si ce dernier est disponible en permanence et en tout lieu.

Effets de la géométrie des satellites et des masquages

Dans les systèmes de navigation GPS ou Galileo, différentes sources d'erreur contribuent à dégrader la précision du positionnement.

Cette précision dépend de deux contributions principales :

- la géométrie de la constellation ;
- les erreurs dans la mesure de distance entre le satellite et le récepteur.

Nous allons tout d'abord aborder les effets de la géométrie, caractérisés par le facteur « DOP ».

La dilution de précision, ou DOP (Dilution of Precision)

Nous pouvons considérer en première approximation que la précision de positionnement est proportionnelle aux erreurs de mesure de distance et à un facteur géométrique, nommé DOP (Dilution of Precision), soit, de façon simplifiée :

Précision de positionnement = DOP × erreurs de mesure de distance

Nous détaillons dans les sections suivantes les différentes sources des erreurs de mesure de distance.

Concernant le DOP, il convient de distinguer le VDOP (DOP vertical), le HDOP (DOP horizontal) et le TDOP (DOP temporel) :

- Précision de positionnement vertical = VDOP × erreurs de mesure de distance
- Précision de positionnement horizontal = HDOP × erreurs de mesure de distance
- Précision de restitution du temps = TDOP × erreurs de mesure de distance

Le DOP caractérise en fait, à un instant donné et en un lieu donné, la géométrie de la constellation telle que peut la voir un récepteur. Ce DOP varie d'un instant à un autre en fonction des différents mouvements des satellites les uns par rapport aux autres et par rapport à l'usager.

La figure 1.16 fournit, à travers un résultat de simulation, un exemple de variation du DOP en fonction du temps.

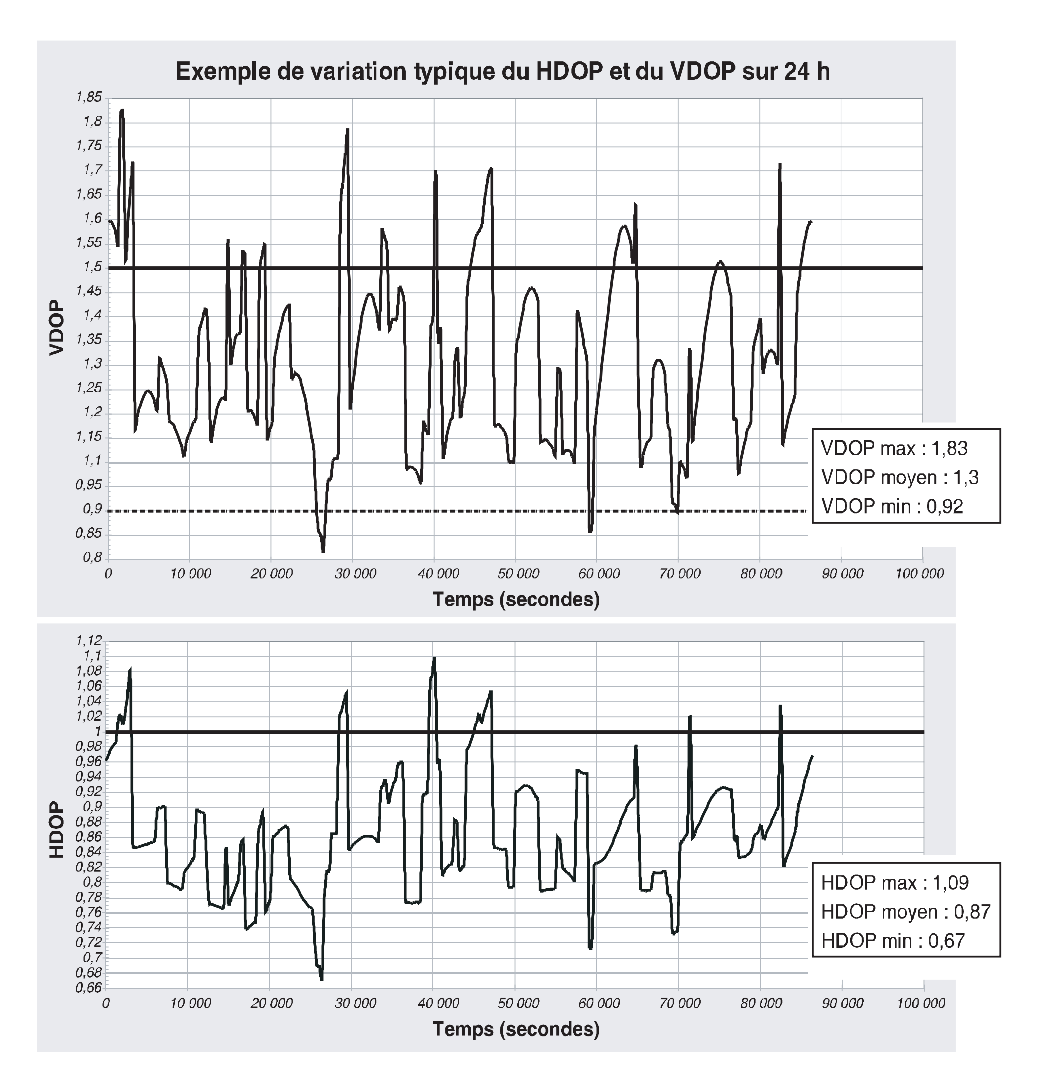


Figure 1.16

Variations typiques du DOP en fonction du temps pour la constellation GPS
(source Alcatel Alenia Space)

Variations du DOP

Afin de comprendre les raisons de ces variations du DOP, imaginons deux configurations géométriques extrêmes et leurs effets sur la précision du positionnement :

- **Configuration A.** Tous les satellites sont très proches les uns des autres et proches de la verticale du lieu de l'usager. Dans une telle configuration, le récepteur dispose de plusieurs mesures dans l'axe vertical de sa position, ce qui lui assure une bonne précision de positionnement vertical. Par contre, l'absence de mesures dans les dimensions horizontales conduit à une forte indétermination de la position horizontale de l'usager. De larges variations de la position de ce dernier dans le plan horizontal ne se traduiront que par de très faibles variations des mesures de distance par rapport aux satellites placés à la verticale. Cette forte indétermination conduit à une dégradation, ou dilution, de la précision de positionnement horizontal.

  La figure 1.17 illustre un exemple de configuration défavorable à un positionnement horizontal précis.

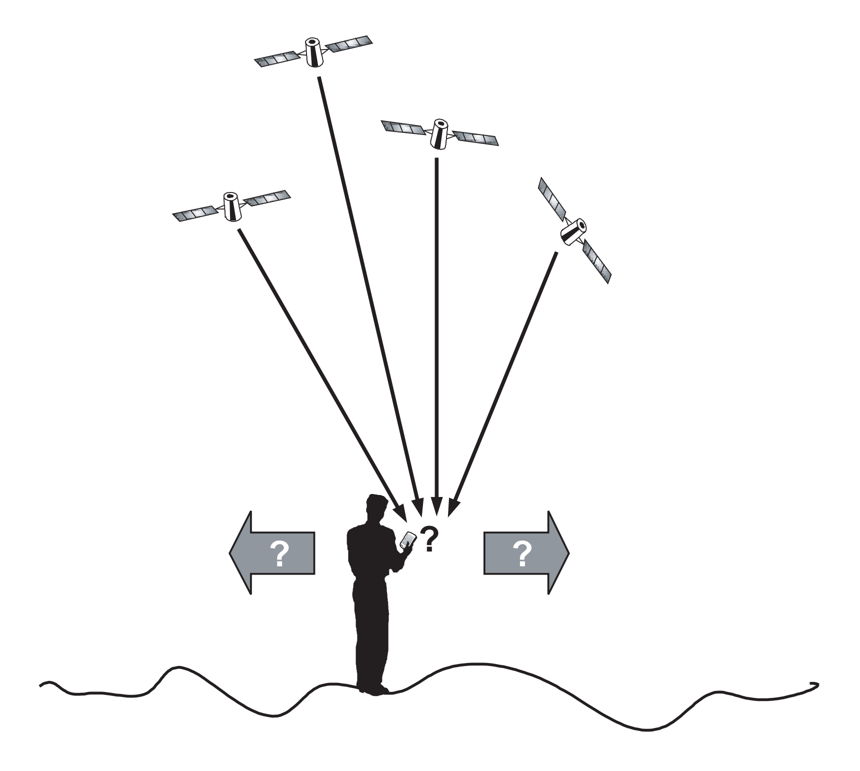


Figure 1.17

Configuration géométrique défavorable au positionnement horizontal

- **Configuration B.** Imaginons à l'inverse que tous les satellites visibles par l'usager soient très bas sur l'horizon. Dans une telle configuration, le récepteur dispose de plusieurs mesures dans le plan horizontal, qui lui assurent un positionnement horizontal précis. Par contre, n'ayant pas de mesure dans la direction verticale, le positionnement selon l'axe vertical sera très indéterminé, et le VDOP (précision de positionnement en altitude) sera dégradé.

  La figure 1.18 donne un exemple de configuration défavorable à un positionnement vertical précis.

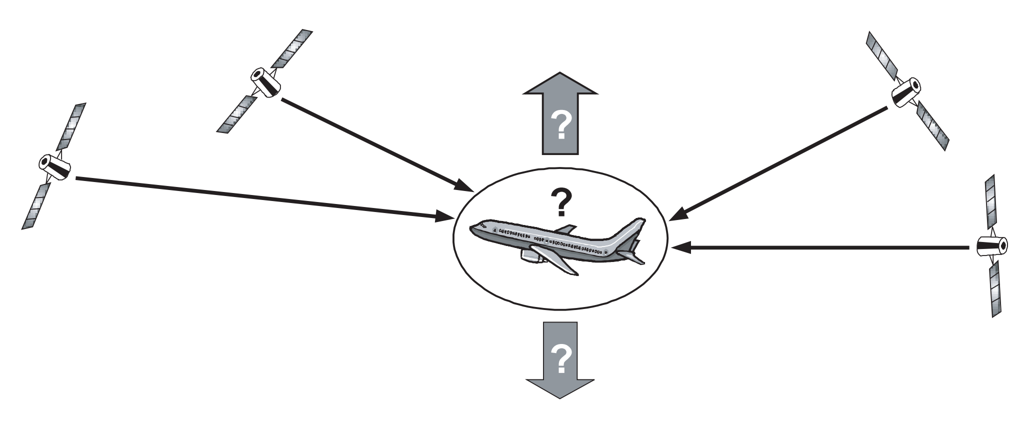


Figure 1.18
Configuration géométrique défavorable au positionnement vertical

L'influence de la dilution de précision sur la qualité du service de navigation est très importante, et l'on observe de fortes variations de précision du fait de ces effets géométriques.

C'est la raison pour laquelle le choix des caractéristiques des constellations GPS et Galileo a été soumis à de nombreuses études approfondies afin d'optimiser les valeurs du DOP sur l'ensemble du globe. Il est également nécessaire, au cours de la durée de vie du système, de veiller au bon remplacement des satellites défectueux afin d'éviter toute dégradation des propriétés géométriques de la constellation.

La figure 1.19 présente le résultat d'une simulation sur l'ensemble du globe, réalisée avec la constellation GPS, permettant d'observer les variations du DOP en fonction des zones géographiques.

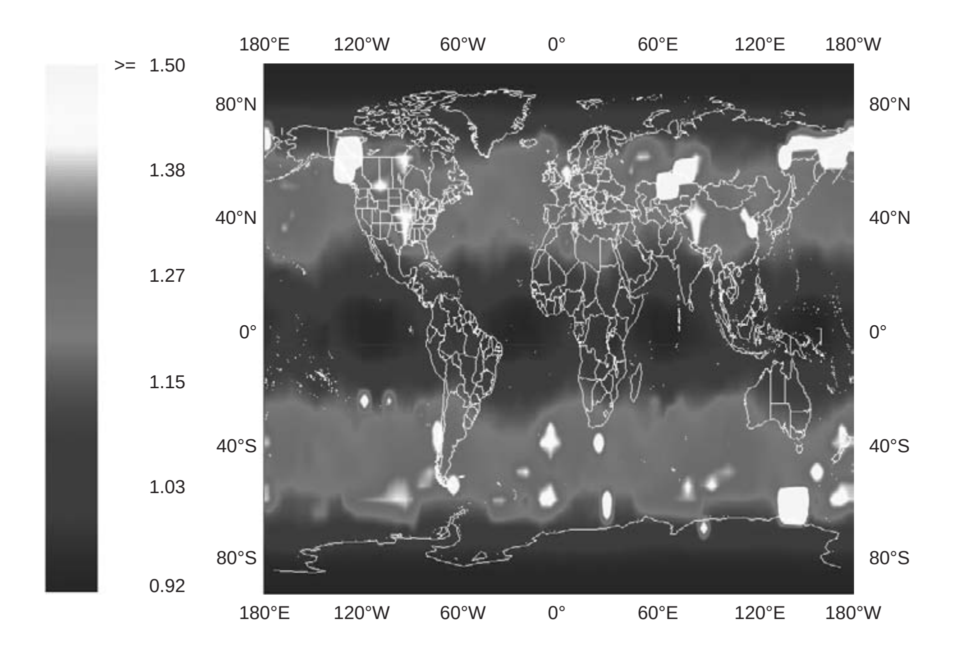


Figure 1.19
Répartition de la dilution de précision sur le globe pour la constellation GPS
(source Alcatel Alenia Space)

Effets de masquage

Si les caractéristiques de la constellation déterminent en grande partie la qualité du DOP, il en va de même pour les effets liés à l'environnement immédiat de l'usager.

Les signaux GPS et Galileo sont très fortement atténués dès lors qu'ils doivent traverser un milieu différent que l'air, tels des murs. L'usager peut donc se retrouver en des lieux où certains satellites présents au-dessus de l'horizon sont en réalité masqués par des obstacles. Cette perte de visibilité de certains satellites dégrade le DOP disponible pour l'usager et la précision du service.

Reprenons l'exemple de la configuration A, qui illustre les effets des masquages des satellites en environnement urbain. Dans des rues étroites bordées d'immeubles, les récepteurs GPS ou Galileo sont privés de mesures provenant des satellites situés en position basse sur l'horizon. Nous observons en ce cas une dégradation du HDOP et, par voie de conséquence, de la précision du positionnement horizontal.

La figure 1.20 donne un exemple de situation de masquage, dans lequel le DOP est dégradé à cause des obstacles entourant le récepteur utilisateur.

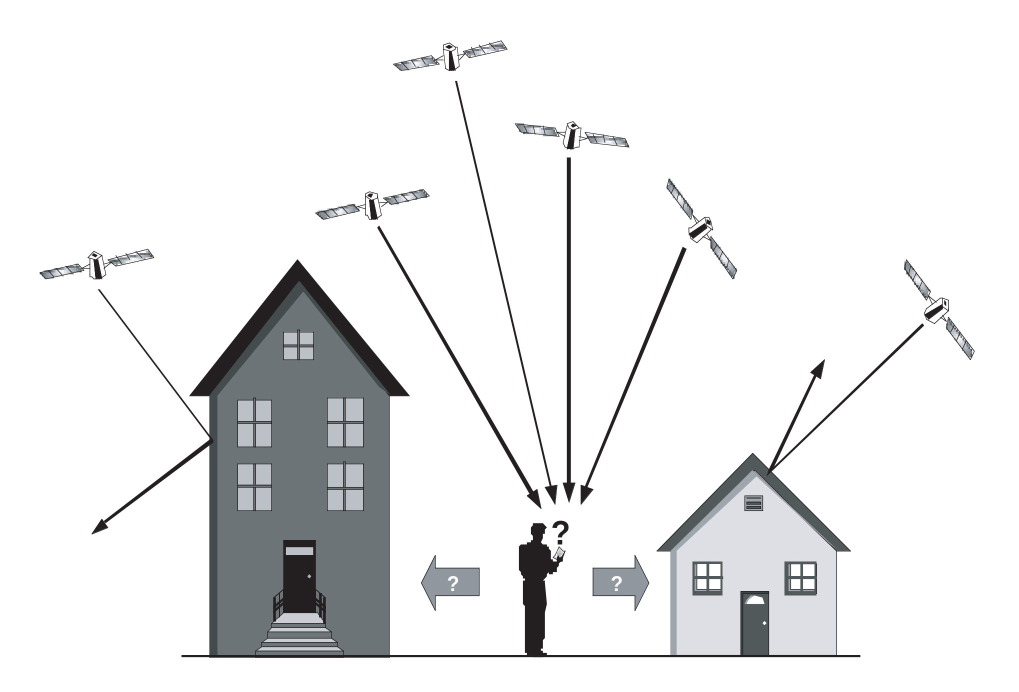


Figure 1.20

Effets des masquages sur la dégradation du HDOP

Outre le facteur géométrique et les masquages, les différentes erreurs affectant la position du satellite ou la mesure de distance entre le récepteur et le satellite contribuent directement à l'imprécision du positionnement. Ces erreurs peuvent avoir des origines multiples, que nous détaillons dans les sections suivantes.

Positionnement des satellites

Nous avons vu que, dans le principe de positionnement par satellite, le récepteur usager avait besoin de connaître la position des satellites dont il utilise le signal pour déterminer sa position. Cette information de position est fournie à l'usager par le satellite lui-même, grâce aux messages de navigation qu'il diffuse dans son signal.

Ces informations de position des satellites doivent permettre à tous les usagers de calculer, à tout instant de mesure, la position précise des satellites qu'ils utilisent. Or le satellite se déplace à une vitesse de l'ordre de 4 km/s, c'est-à-dire qu'il parcourt 4 m en un millième

de seconde. Comme la précision de positionnement des satellites que nous recherchons est de l'ordre du mètre, nous concevons bien que le satellite ne puisse diffuser quelque 4 000 positions successives par seconde. Il diffuse donc un ensemble de paramètres, qui permettent à l'usager de calculer lui-même la position du satellite à l'instant désiré. On appelle ces paramètres les éphémérides des satellites.

Cependant, ces paramètres sont entachés d'erreurs, qui se traduisent par des erreurs de positionnement de l'usager lorsque celui-ci utilise les éphémérides pour calculer sa position.

La figure 1.21 illustre les effets d'une erreur de positionnement d'un satellite sur la mesure de distance qui lui est associée. Remarquons que cette erreur dépend de la situation du récepteur utilisateur par rapport à la direction dans laquelle se trouve l'erreur de positionnement du satellite.

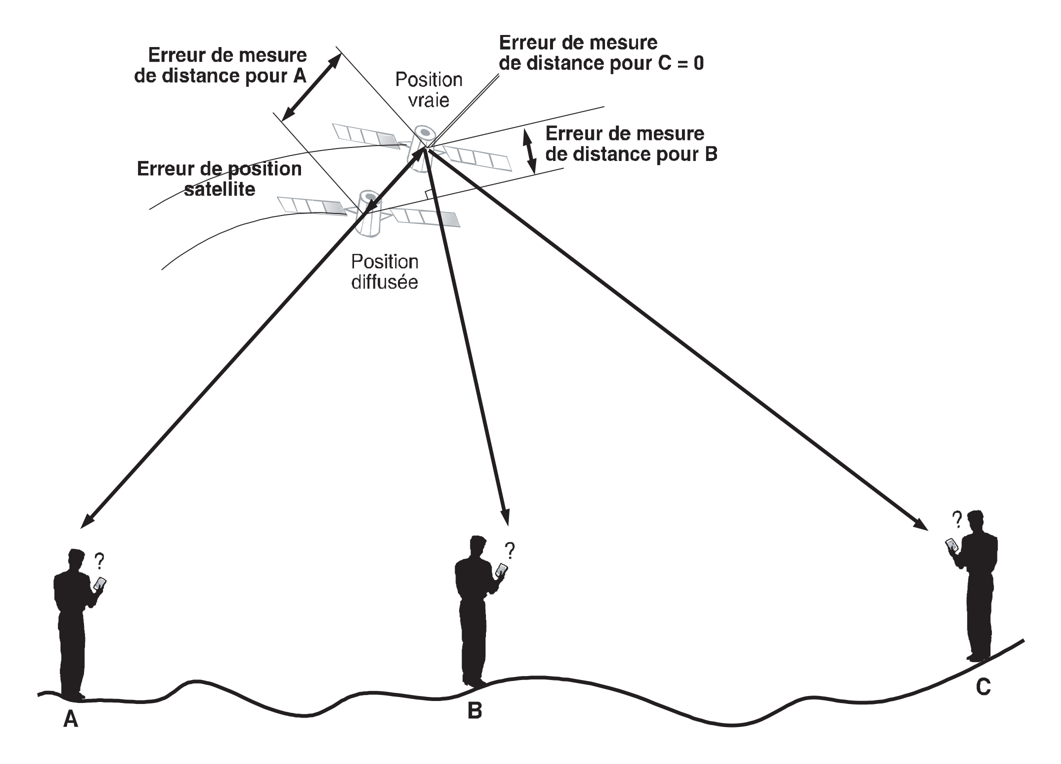


Figure 1.21

Effets des erreurs de positionnement des satellites

En fait, ces éphémérides ne sont pas élaborées par le satellite lui-même, mais sont calculées au niveau du segment sol des systèmes GPS et Galileo. C'est en fonction de la performance

de ces infrastructures au sol que la précision de positionnement des satellites peut être déterminée.

Les moyens à mettre en place au sol pour atteindre les performances recherchées sont assez importants. Il s'agit de déterminer la position d'environ 30 objets orbitant autour du globe à une vitesse de 4 000 m/s à 20 000 km d'altitude. Cette position doit être prédite plusieurs heures à l'avance. En effet, le satellite n'étant pas en contact permanent avec le sol pour recevoir les dernières éphémérides calculées, il doit utiliser des éphémérides qui auront été prédites plusieurs heures auparavant et enregistrées par le satellite lors de son dernier contact avec les stations au sol.

De nombreux paramètres peuvent entacher d'erreurs les éphémérides calculées au sol. Les mouvements des satellites autour de la Terre sont soumis à de multiples perturbations, comme l'attraction de la Lune ou du Soleil, les effets du vent solaire — flux de particules émises par le Soleil et venant frapper la surface du satellite —, ou bien encore les effets des différences de relief ou de gravité de notre planète.

La recherche d'une précision de l'ordre de 1 m sur la position des satellites, ce qui est le cas de Galileo et des futures évolutions du GPS, exige la mise en œuvre de nombreuses stations de mesures, réparties à la surface du globe, ainsi que de puissants calculateurs estimant les effets des différentes perturbations sur les mouvements des satellites.

Synchronisation des satellites

Comme expliqué précédemment, le principe du positionnement par satellites demande que les signaux des satellites utilisés par le récepteur usager afin de déterminer sa position soient parfaitement synchronisés par rapport à une référence de temps commune, appelée « temps système ».

Toute erreur de synchronisation d'un satellite par rapport à ce temps système se traduit directement par une erreur de calcul de la distance séparant le récepteur du satellite. Le récepteur utilise en ce cas des mesures de distance qui positionnent les satellites plus près ou plus loin qu'ils ne le sont en réalité.

La figure 1.22 illustre l'effet d'une erreur de synchronisation d'un satellite sur la mesure de distance qui lui est associée. Remarquons que cette erreur est la même pour tous les récepteurs utilisant ce satellite.

Les horloges des satellites doivent donc être maintenues parfaitement synchronisées par rapport à une horloge de référence installée dans les centres de contrôle au sol.

Imaginons que nous parvenions à synchroniser parfaitement une horloge embarquée sur un satellite par rapport à l'horloge de référence au sol. Tout comme nos montres finissent par prendre de l'avance ou du retard, les horloges embarquées à bord des satellites se désynchronisent lentement par rapport au temps de référence maintenu au sol.

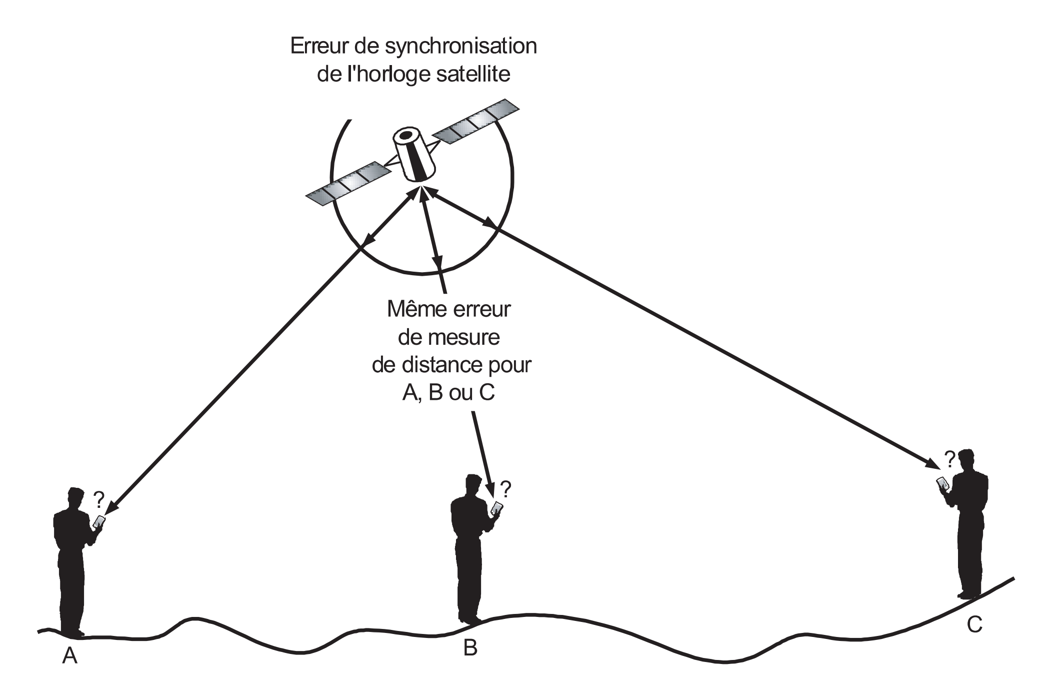


Figure 1.22
Effets des erreurs de synchronisation des horloges des satellites

La première condition pour maintenir la synchronisation des satellites est donc d'embarquer des horloges, ou *oscillateurs*, les plus stables possibles. On parle d'horloges ultrastables.

Pour ne pas dégrader de façon excessive la performance du positionnement, nous recherchons une précision de positionnement de l'ordre du mètre. Les erreurs de désynchronisation ne doivent donc pas conduire à des erreurs de calcul de distance de plus de quelques centimètres.

Nous avons vu qu'une erreur de 1 m sur le calcul de distance correspondait à une erreur de synchronisation de l'ordre de 3 ns (nanoseconde), soit trois milliardièmes de seconde. Il s'agit donc de mettre en place des horloges qui gardent une stabilité de l'ordre de 0,1 ns entre les contacts successifs du satellite avec le centre de contrôle au sol, autrement dit des horloges qui ne prennent qu'une seconde d'avance ou de retard au bout de trois cents ans.

Pour comprendre comment l'évolution de la technologie a permis d'atteindre de telles précisions, il est intéressant de revenir sur les principes de la mesure du temps.

Principes de la mesure du temps

La mesure du temps repose sur la mise en place d'un système, appelé oscillateur, fournissant des oscillations avec une très grande régularité. C'est par la mesure du nombre des battements de ce système oscillant que l'on mesure l'écoulement du temps.

La vitesse de rotation de la Terre autour d'elle-même fournit une référence oscillante facilement accessible. C'est la raison pour laquelle elle a longtemps été utilisée comme standard de référence de la mesure du temps. Ce mouvement de rotation de la Terre autour d'elle-même n'est toutefois pas parfaitement régulier et connaît des variations de l'ordre du millième de seconde par jour. La référence à la rotation terrestre était encore utilisée du temps des horloges pendulaires, car la précision de la mesure du temps sur un jour réalisée à partir des battements des pendules correspondait à peu près aux irrégularités de la variation de la vitesse de rotation terrestre.

Avec l'apparition de sources oscillantes beaucoup plus stables, comme les vibrations d'un cristal de quartz, il est apparu que la rotation terrestre ne pouvait plus être utilisée comme standard. L'utilisation des horloges à quartz a permis de faire un bond gigantesque en multipliant par 1 000 la précision de la mesure du temps. Ces horloges permettent de mesurer l'écoulement du temps avec une précision inférieure à un millionième de seconde de décalage par jour.

Horloges atomiques

Cela n'est cependant toujours pas suffisant pour les systèmes de navigation par satellite, qui doivent encore être mille fois plus précis que les horloges à quartz. Une telle précision est devenue possible avec les horloges dites *atomiques.* Ces horloges utilisent les propriétés de certains matériaux au niveau de leurs atomes, exploitant les oscillations de ces atomes entre différents niveaux d'énergie. On utilise pour cela des éléments primaires, comme le césium, le rubidium ou encore l'hydrogène. De telles horloges atteignent des précisions de mesure du temps inférieures à un milliardième de seconde par jour.

Le tableau 1.1 récapitule les erreurs de synchronisation des différents types d'horloges rapportées au temps qu'elles mettent à perdre une seconde. La stabilité des horloges est aussi généralement caractérisée par le ratio $\Delta f/f$, qui représente la variation de la fréquence d'oscillation en une journée rapportée à la fréquence de l'oscillateur.

Tableau 1.1 – Stabilité et erreurs de synchronisation de différents types d'oscillateurs

Type d'horloge	Stabilité $\Delta f/f$ par jour	Durée avant de perdre 1 s (en années)
Quartz	10^{-9}	30
Rubidium	10^{-12}	30 000
Césium	10^{-13}	300 000
Hydrogène	10^{-14}	3 000 000

La construction d'horloges atomiques pour des applications spatiales est devenue une réalité avec la mise en place du système GPS. Plusieurs fabricants américains, russes et européens bénéficiant des travaux de nombreux laboratoires scientifiques et soutenus par les administrations concernées, militaires comme civiles, ont su relever le défi technologique que constituait la mise au point de telles horloges, fonctionnant dans des conditions extrêmes et présentant une masse et une consommation d'énergie suffisamment faibles pour être embarquées à bord des satellites.

Effets de la précision des horloges sur le positionnement

La stabilité des horloges actuelles ne suffit pas tout à fait à assurer le maintien de la synchronisation de nos satellites. En effet, si nous voulons assurer une erreur de positionnement de 1 m au niveau du récepteur usager, il faut préalablement assurer que l'erreur combinée en temps et en position des satellites GPS/Galileo est inférieure à 1 m (Galileo s'est donné pour objectif une performance temps et position des satellites de 65 cm). Or, une dérive de un milliardième de seconde en un jour conduit à une erreur de 1 m de la mesure de distance en trois jours.

À l'aide d'un réseau de stations déployées au sol dans des centres de contrôle GPS ou Galileo et écoutant les signaux des satellites, il est possible d'estimer la dérive des horloges embarquées et de calculer ainsi des paramètres de correction des horloges. Ces derniers vont donner l'avance ou le retard de chaque horloge des satellites par rapport au temps de référence.

Ces paramètres, qui sont réévalués en permanence, sont ensuite envoyés au satellite à échéance régulière. Ce dernier les diffuse aux récepteurs usagers par le biais des messages de navigation transmis dans son signal.

Ces opérations de calcul de *correction d'horloge* doivent être effectuées très régulièrement, de façon à communiquer tout aussi régulièrement, idéalement tous les jours, les dernières corrections à chaque satellite. C'est le rôle dévolu aux opérateurs au sol et à l'infrastructure sol de contrôle.

Erreurs de mesure de distance

La mesure de distance effectuée par le récepteur entre lui-même et le satellite repose sur l'hypothèse que le signal émis par le satellite se propage en ligne droite et à la vitesse constante de la lumière.

Cela n'est pas tout à fait le cas dans la réalité, car certains phénomènes viennent perturber cette situation idéale, conduisant à des erreurs de mesure, qui, à leur tour, dégradent la précision du positionnement.

Effets atmosphériques

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches d'air superposées. Chaque couche a des propriétés de température et de composition physique différentes, mais relativement homogènes à l'intérieur d'une même couche.

On peut établir une première différenciation de ces couches selon leurs variations de températures. La première couche, celle où nous vivons, est appelée *troposphère*. Son épaisseur est d'environ 10 à 12 km, sa température diminuant régulièrement avec l'altitude. La couche suivante, dite *stratosphère*, voit la température remonter légèrement jusqu'à environ 50 km d'altitude. Dans la troisième couche, ou *mésosphère*, qui atteint 80 à 85 km, la température décroît à nouveau. Plusieurs autres couches se succèdent, qui ont chacune des températures différentes.

Pour les systèmes de navigation par satellite, on ne retient que les effets de propagation dans la stratosphère et la troposphère, dits « effets troposphériques ». En effet, l'essentiel de la masse de l'atmosphère se trouvant dans les altitudes inférieures à 40 km, on considère que les effets troposphériques sont négligeables au-delà de cette altitude.

L'atmosphère possède d'autres propriétés susceptibles de varier en fonction de l'altitude, notamment la composition de l'air. Plus on s'élève, plus la densité de l'air diminue, c'est-à-dire que le nombre d'atomes et de molécules dans un volume donné baisse.

Par ailleurs, les molécules sont soumises aux rayonnements en provenance de l'espace, en particulier aux rayonnements ultraviolets du Soleil. Les effets de ces rayonnements conduisent certaines molécules et atomes à se dissocier, libérant des électrons dits libres. Ce phénomène est appelé *ionisation*, et l'on parle d'ionosphère pour les régions de l'espace comprises entre environ 50 et 1 500 km d'altitude.

Les effets ionosphériques prennent la forme d'électrons libres qui perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo. Ces phénomènes d'ionisation sont en fait extrêmement variables suivant la région du globe considérée, le champ magnétique terrestre et les variations de l'activité et du rayonnement solaires.

La figure 1.23 illustre la décomposition de l'atmosphère et des couches troposphériques et ionosphériques qui perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo.

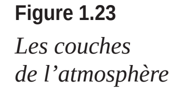
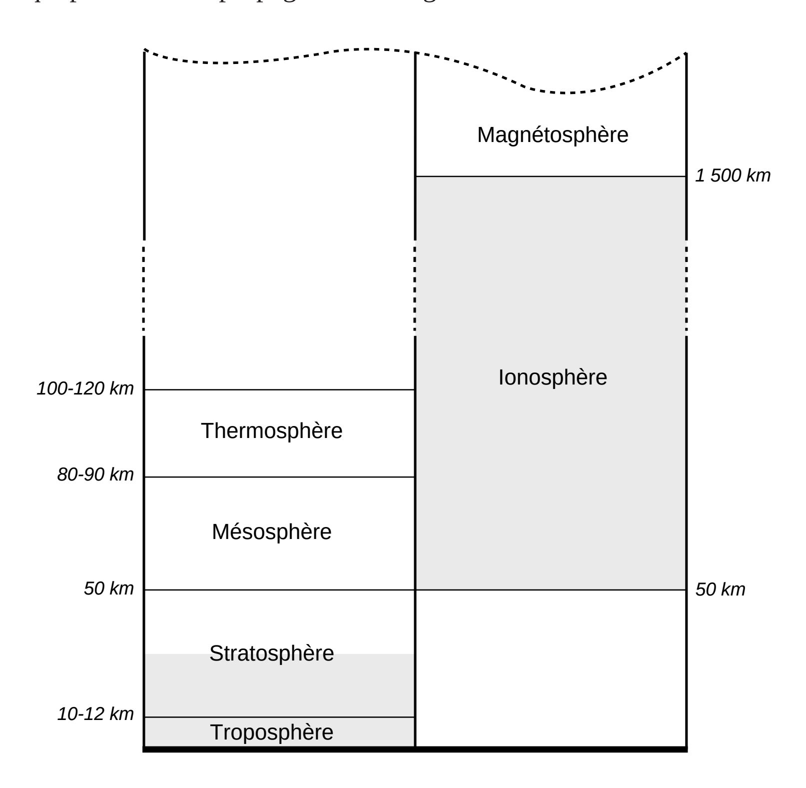


Figure 1.23
Les couches de l'atmosphère



Erreurs liées aux effets ionosphériques

L'un des effets les plus surprenants de l'ionosphère sur la propagation des signaux GPS ou Galileo est que l'onde porteuse et sa modulation (le code) voyagent à des vitesses différentes. La vitesse de propagation du code ralentit et devient légèrement plus faible que la vitesse de la lumière. En se souvenant de notre exemple de train roulant à une vitesse réelle plus faible que celle que l'on pensait, nous comprenons que la mesure de la distance apparaisse supérieure à ce qu'elle est dans la réalité. La cause de ce décalage est appelée *délai ionosphérique*.

Le délai ionosphérique dépend essentiellement de deux paramètres : la fréquence du signal et la densité d'électrons libres dans l'ionosphère.

Le tableau 1.2 donne des exemples de délais ionosphériques pour différentes fréquences et pour deux états de l'ionosphère, « calme » et « excité ».

Tableau 1.2 – Erreurs de mesures de distance dues aux effets ionosphériques

Fréquence du signal	Ionosphère « calme »	Ionosphère « excitée »
100 MHz	40 m	4 km
Fréquences GPS/Galileo	30 cm	30 m
10 GHz	4 mm	40 cm

De telles erreurs ne permettant pas d'atteindre la précision de quelques mètres exigée par le GPS et Galileo, il faut mettre en place des systèmes de correction d'erreur.

Il existe deux systèmes correctifs, suivant que les récepteurs utilisent une ou deux fréquences :

- Récepteurs utilisant une seule fréquence (cas des récepteurs grand public GPS, qui n'utilisent que la fréquence L1, en accès libre) : un modèle est utilisé pour corriger le délai ionosphérique grâce à des paramètres transmis par les satellites GPS ou Galileo dans leurs messages de navigation. Ces corrections permettent de diviser par deux les erreurs liées aux effets ionosphériques. Les performances des récepteurs monofréquence sont susceptibles d'être dégradées de plusieurs mètres ou dizaines de mètres par les perturbations ionosphériques.
- Récepteurs utilisant deux fréquences (cas des récepteurs militaires GPS, qui utilisent les fréquences L1 et L2) : il est possible de comparer les effets ionosphériques entre ces deux fréquences et d'en déduire des corrections éliminant totalement les erreurs ionosphériques. Les performances des récepteurs bifréquence ne sont pas dégradées par les effets ionosphériques.

Erreurs liées aux effets troposphériques

Lors de la traversée des couches basses de l'atmosphère, la troposphère, les signaux GPS et Galileo paraissent parcourir un chemin plus long que la ligne droite géométrique reliant le récepteur et le satellite. Ce phénomène est appelé *réfraction.* Le chemin parcouru paraissant plus long, la mesure de distance entre le récepteur et le satellite est supérieure à la réalité.

La réfraction est à son minimum quand le satellite est à la verticale de l'usager, avec une erreur troposphérique de l'ordre de 2 m, et à son maximum quand le satellite est au plus bas sur l'horizon, avec une erreur allant jusqu'à 30 m pour un satellite à 5 degrés au-dessus de l'horizon. Ces erreurs dépendent en outre de la température, de l'humidité de l'air, de la pression atmosphérique et, bien entendu, de l'altitude.

Le délai troposphérique est le même pour toutes les fréquences. Il n'est donc pas possible de le corriger en utilisant deux fréquences différentes, contrairement au délai ionosphérique. Les récepteurs utilisent à la place des modèles dits de compensation de délais troposphériques, qui permettent d'estimer ces délais et de corriger les mesures de distance. Les erreurs résiduelles après application de ces compensations sont généralement inférieures à quelques dizaines de centimètres.

Effets des multitrajets et des interférences

Après leur propagation à travers les différentes couches de l'atmosphère, les signaux GPS et Galileo sont captés par des antennes et traités par des *corrélateurs* implémentés au sein des récepteurs.

La fonction d'un corrélateur est de reproduire les séquences de code générées par le satellite et de les faire coïncider avec les séquences de code reçues dans le signal. Grâce à cette opération de corrélation, le récepteur peut déterminer le temps d'arrivée de chaque séquence de code par rapport à son horloge locale, et ainsi effectuer sa mesure de distance.

L'opération de corrélation peut cependant être perturbée par des signaux parasites, provenant d'interférences ou de multitrajets.

- **Interférences.** Comme les récepteurs radio, les récepteurs GPS et Galileo peuvent être brouillés par la réception de signaux parasites, émis à des fréquences proches des fréquences GPS et Galileo. C'est le cas, par exemple, de certains radars ou systèmes de repérage au sol utilisés dans la navigation aérienne. Les effets des interférences sont très variables et peuvent induire des erreurs dans la mesure de distance de l'ordre du mètre ou conduire à la perte momentanée de réception du signal.
- **Multitrajets.** On parle de multitrajet quand un même signal en provenance d'un satellite GPS ou Galileo est capté plusieurs fois par le récepteur. Cela peut se produire

lorsque les signaux se réfléchissent sur des surfaces environnantes et sont captés par le récepteur après leur réflexion, en plus du signal reçu directement depuis le satellite. Le corrélateur du récepteur reçoit alors une superposition de signaux présentant le même code, mais décalés dans le temps (les signaux réfléchis ont parcouru une plus grande distance et sont donc retardés) et de puissances différentes (les signaux réfléchis sont toujours plus atténués). Cela se traduit par une distorsion de l'opération de corrélation, plus ou moins importante selon la puissance et le retard du signal réfléchi, les caractéristiques de l'antenne et celles du récepteur.

La figure 1.24 illustre la géométrie des multitrajets dans l'environnement du récepteur utilisateur.

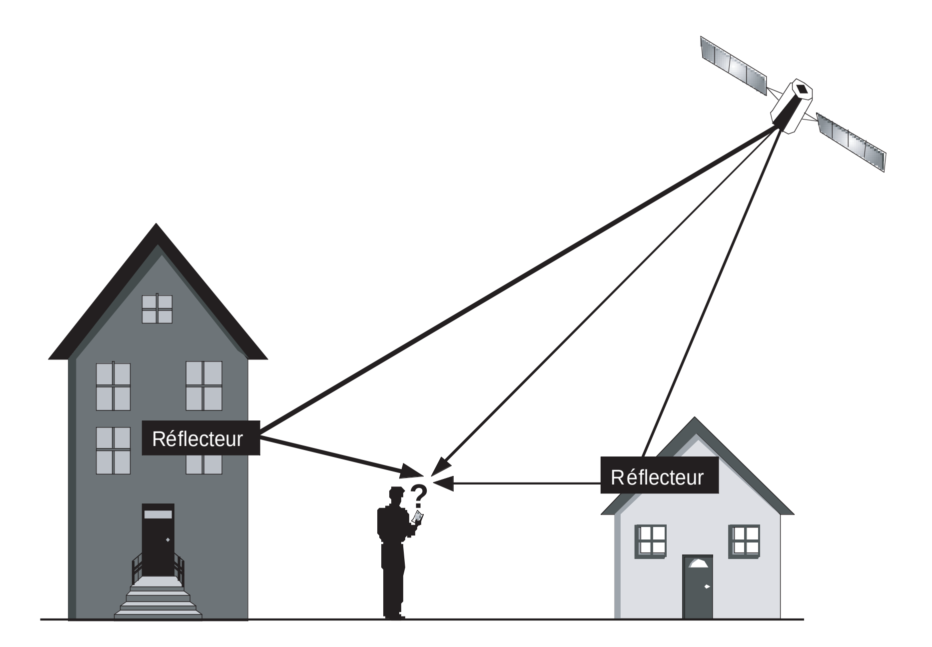


Figure 1.24
Les multitrajets

En règle générale, les réflexions provenant de signaux de satellites situés très bas sur l'horizon sont peu atténuées et peu retardées, engendrant des effets de multitrajets importants et rendant délicate l'exploitation des mesures en provenance de ces satellites. Les surfaces réfléchissantes peuvent être le sol, la mer, des toits, des bâtiments, des arbres, etc. Les erreurs de mesures de distances provoquées par les multitrajets peuvent atteindre plusieurs mètres.

Cartes et référentiels

Pour conclure notre aperçu des performances des systèmes GPS et Galileo et offrir une vision complète du principe de positionnement par satellite, il est important de bien comprendre la référence utilisée par la localisation GPS ou Galileo, en d'autres termes, par rapport à quoi cette localisation nous permet de nous positionner.

Prenons un exemple de localisation GPS pris au hasard sur un site Internet :

1,483 60 ; 43,631 69

Excepté certaines applications spécifiques, cette information brute n'apporte généralement pas grand-chose à l'utilisateur. Ce dernier cherche à se positionner par rapport à des lieux dont la position est connue et dans un environnement géographique décrit sur une carte. Il lui est donc essentiel de pouvoir rapprocher sa position GPS ou Galileo de positions GPS ou Galileo fournies par cette carte.

L'exemple de localisation ci-dessus, qui correspond à l'emplacement d'un grand magasin à Toulouse, ne peut être représenté sur une carte que si chaque repère (rue, immeuble, etc.) de cette carte est également associé à une position GPS ou Galileo.

Les récepteurs ont donc besoin d'une large base de données fournissant les coordonnées GPS ou Galileo de chaque élément cartographique affiché à l'utilisateur.

Nous comprenons aisément que toute erreur dans ces bases de données se traduit, vu de l'utilisateur, par une erreur de positionnement entre la réalité de la position indiquée par son récepteur et la position du lieu recherché sur la carte.

Si certaines zones de la surface terrestre sont cartographiées très précisément, chaque lieu géographique étant parfaitement positionné dans le référentiel GPS ou Galileo, il n'en va pas de même pour de larges zones peu fréquentées. C'est l'objet du développement de bases de données géographiques, ou GIS (Geographic Information System), que de viser à recenser tous les lieux et informations géographiques dans une zone ou la totalité de la surface terrestre, associés à leurs coordonnées GPS/Galileo précises.

Dans notre exemple de position, le premier nombre (1,483 60) correspond à la longitude, et le second (43,631 69) à la latitude.

Remarquons le nombre important de chiffres après la virgule : le dernier chiffre correspond à dix millionièmes de degrés de latitude, c'est-à-dire à environ 1 m.

Lorsque nous manipulons des positions géographiques d'une telle précision, nous utilisons en fait une référence, appelée *référentiel géodésique*. En effet, les systèmes géodésiques utilisés historiquement pour la cartographie diffèrent d'un pays à un autre.

La constitution de ces systèmes géodésiques locaux s'appuie sur un modèle de surface terrestre raccordé à la surface réelle en un ou plusieurs points de référence connus. Le modèle de surface terrestre utilisé est dit *ellipsoïde* et correspond à une sphère légèrement aplatie aux pôles afin de mieux représenter la véritable forme de la surface terrestre.

Les coordonnées en longitude, latitude et altitude sont déterminées par rapport à cet ellipsoïde de référence.

La figure 1.25 illustre le principe de constitution d'un référentiel géodésique local, constitué d'un ellipsoïde de référence raccordé à la surface terrestre au niveau d'un point de référence.

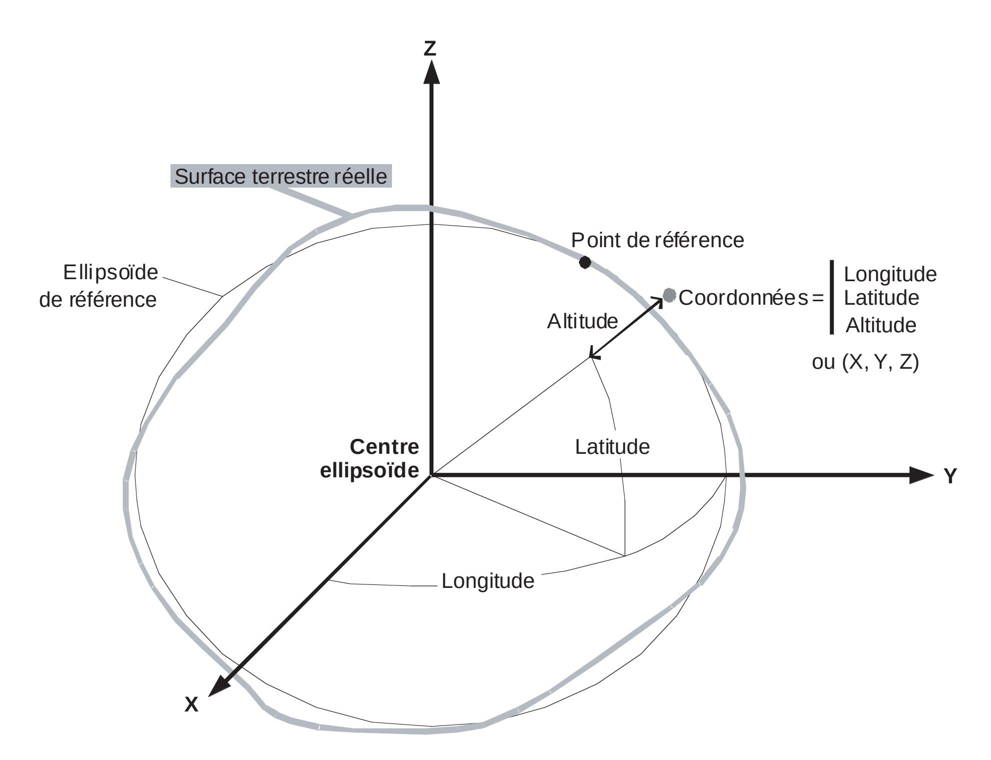


Figure 1.25

Référentiel géodésique local

Développé dans la seconde moitié du XXe siècle, le système historique français, dit NTF (nouvelle triangulation de la France), s'appuie notamment sur un point de référence fondamental défini par « la croix du Panthéon », à Paris.

La mise en place du système GPS a imposé l'avènement d'un autre type de système géodésique, dit spatial, appelé système WGS-84. Ce système WGS (World Geodetic System) a été réalisé par le département de la Défense américain à partir des positions de bases propres au système GPS et de constantes fondamentales. Toutes les coordonnées GPS prennent leur signification dans ce système géodésique.

Les écarts entre des coordonnées en référentiel NTF et des coordonnées en référentiel WGS-84 peuvent aller jusqu'à 300 m.

Le système Galileo est pour sa part associé à un modèle géodésique spatial spécifique, appelé GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame), établi à partir des positions de référence des stations du réseau sol Galileo.

Afin d'unifier ces différents systèmes géodésiques, l'organisme IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) établit et gère un système géodésique international, nommé ITRF (International Terrestrial Rotation Frame), à partir de multiples mesures provenant du GPS et d'autres systèmes géodésiques.

Certains mécanismes mathématiques simples permettent de transformer des coordonnées fournies dans un système géodésique donné vers des coordonnées ITRF, et *vice versa*.

Les systèmes géodésiques WGS-84 et ITRF coïncident à moins de 10 cm près. Il en sera de même du système géodésique Galileo, le GTRF, qui coïncidera avec l'ITRF à quelques centimètres près.

Les systèmes GPS et Galileo sont donc conçus pour fournir des positions compatibles à moins d'un mètre près. Les champs d'application de la localisation par satellite utilisant GPS et Galileo ne cesseront de s'élargir du fait du développement de bases de données géographiques et cartographiques de plus en plus précises.

Conclusion

Nous avons pu explorer dans ce premier chapitre les principes de fonctionnement des systèmes de navigation par satellite, ainsi que les différents facteurs qui déterminent leur performance, et au final, la qualité du service de positionnement et de synchronisation fourni à l'utilisateur.

Nous avons également mis en évidence que, par conception, ces systèmes pouvaient avoir un nombre illimité d'utilisateurs sur Terre et ainsi servir de base à un développement sans contrainte de multiples applications.

Nous abordons aux chapitres 2 et 3 les différents types de récepteurs utilisateur ainsi que les applications qui utilisent GPS et Galileo.

2

Les récepteurs

C’est au travers de récepteurs que les utilisateurs des systèmes GPS et Galileo accèdent aux services de positionnement et de datation et aux applications dérivées. Les caractéristiques de ces récepteurs, seuls équipements visibles de l’utilisateur, sont essentielles pour le type d’utilisation recherchée.

Il existe une très grande variété de récepteurs, adaptés à des besoins spécifiques. Certains privilégient la miniaturisation, pour s’intégrer, par exemple, dans des téléphones mobiles, les engins volant légers ou les animaux surveillés. D’autres mettent en avant telle ou telle performance particulière, comme la robustesse, par exemple pour la navigation maritime ou aérienne ou certaines applications militaires, le coût de production, etc.

Le présent chapitre détaille les principes de fonctionnement et l’architecture des récepteurs et décrit leurs principales caractéristiques ainsi que les grandes catégories d’équipements.

Principes de fonctionnement et d'architecture

Les récepteurs implémentent quatre fonctions principales : la réception des signaux, le traitement des signaux, l'oscillateur local et le calcul de position. Leur schéma de fonctionnement est illustré à la figure 2.1.

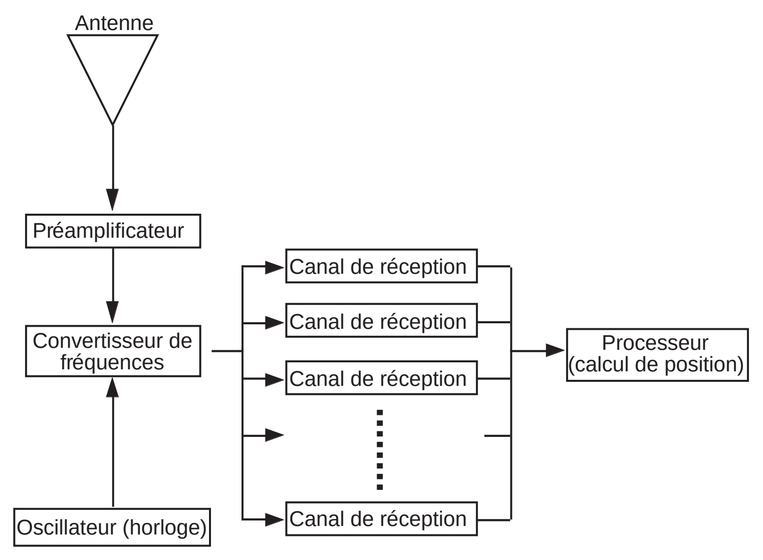


Figure 2.1

Schéma de fonctionnement des récepteurs GPS et Galileo

Réception des signaux

La réception des signaux est réalisée par une chaîne de réception, qui comprend l'antenne, le préamplificateur et le convertisseur :

- **Antenne.** Nous avons vu au chapitre 1 que le récepteur recevait plusieurs signaux provenant de plusieurs satellites (au moins quatre). La première tâche consiste donc à capter ces signaux à l'aide d'une antenne. Cette dernière transforme les ondulations électromagnétiques des signaux se propageant dans l'espace en ondulations d'un courant électrique se propageant le long du câble de sortie de l'antenne.

  Les signaux peuvent provenir de toutes les directions au-dessus de l'horizon. Afin d'optimiser les performances de réception, certaines antennes sont conçues pour recevoir des signaux uniquement en provenance de ces directions au-dessus de l'horizon, et ainsi éliminer les signaux parasites qui proviennent de directions situées en dessous de l'horizon (on parle d'antenne à champ de réception hémisphérique). C'est le cas des récepteurs statiques ou embarqués sur des véhicules, qui ne sont pas

censés se retourner et dont l'antenne est toujours bien tournée vers le ciel. Cependant, dans le cas de récepteurs mobiles amenés à être inclinés ou même retournés par l'utilisateur (l'antenne ne pointe alors plus nécessairement vers le ciel), les antennes doivent être capables de capter des signaux en provenance de n'importe quelle direction (on parle d'antenne omnidirectionnelle).

- **Préamplificateur.** La puissance des signaux reçus au sol étant très faible (les signaux reçus ne sont pas plus puissants que le niveau de bruit électromagnétique environnant), il est nécessaire de les amplifier avant de pouvoir les traiter. C'est la fonction du préamplificateur, qui est directement intégré à la base de l'antenne de réception.
- **Convertisseur.** La fréquence des signaux reçus (plus d'un milliard d'oscillations par seconde) est trop élevée pour permettre de traiter le signal directement afin d'en extraire la mesure de distance et les données. La fonction du convertisseur est de ramener ces oscillations à une fréquence plus faible, souvent appelée fréquence intermédiaire.

Traitement des signaux

Nous avons vu au chapitre 1 que les signaux des différents satellites en visibilité étaient reçus tous ensemble par l'antenne du récepteur. Afin d'en extraire les mesures de distance et les données de navigation, il faut séparer chaque signal individuel et, pour chacun d'eux, mesurer l'instant de réception de la séquence de code grâce à la fonction de corrélation décrite au chapitre 1. Pour cela, les récepteurs sont dotés de plusieurs « canaux », à chacun desquels est attribué le traitement d'un satellite donné.

De nos jours, la majorité des récepteurs disposent de suffisamment de canaux pour traiter simultanément les signaux provenant de tous les satellites en visibilité. La mesure de distance entre le satellite et le récepteur s'effectue en exploitant soit le code, soit la phase. La mesure de distance la plus élémentaire consiste à exploiter le code du signal. Chaque canal génère le code associé au satellite qu'il doit traiter puis, à l'aide de sa fonction de corrélateur, mesure l'instant de réception des séquences de code et extrait le signal provenant du satellite qu'il considère.

Ce signal doit également être démodulé afin de restituer la séquence binaire du code et des messages qui a été modulée par le satellite sur la fréquence porteuse. Cela permet de restituer les données des messages de navigation transmis par ce satellite.

En résumé, chaque canal assure les fonctions suivantes pour le satellite qu'il poursuit *(voir figure 2.2) :*

- réalisation des mesures de distance, à partir des mesures du temps de propagation effectuées par rapport à la datation fournie par l'horloge locale du récepteur ;
- extraction des données du message de navigation.

Selon le niveau de complexité et de performance du récepteur et l'application visée, chaque canal peut en outre produire d'autres données, comme la mesure de phase du

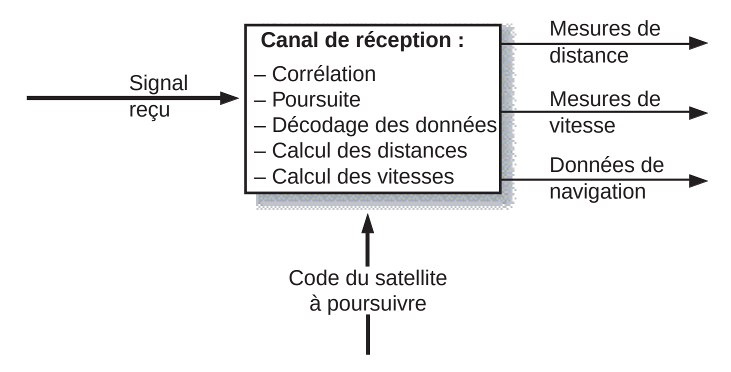


Figure 2.2
Fonctions d'un canal de réception

signal, qui désigne le décompte des oscillations du signal reçu, permettant d'accéder à une mesure de distance plus précise que la mesure de code en remplacement ou en combinaison avec celle-ci, ou des indications sur les caractéristiques des signaux reçus (niveau de la puissance reçue, détection de sauts de phase, etc.) afin de détecter et éliminer les mesures erronées.

Calcul de navigation

Une fois les mesures et données de navigation extraites de chaque signal satellite, les récepteurs utilisent ces informations pour élaborer leur calcul de navigation et fournir la position (P), la vitesse (V) et le temps (T).

La position (trois paramètres) et le temps (un paramètre) sont calculés à l'aide de la résolution de quatre équations. Chacune de ces équations est associée à un satellite. Elle établit la relation qui existe entre la position du récepteur, la position du satellite, l'écart de synchronisation de l'horloge locale du récepteur par rapport au temps système (GPS ou Galileo) et le temps de transmission du signal satellite mesuré par l'horloge du récepteur. Le processeur intégré dans le récepteur résout alors ces quatre équations et en déduit la position du récepteur et le temps.

En utilisant les informations de position successivement calculées, le processeur peut également établir la vitesse de déplacement du récepteur.

Les récepteurs utilisent généralement plus de quatre canaux, ce qui leur permet d'acquérir des mesures par rapport à plus de quatre satellites. Même si cela donne lieu à un nombre plus important d'équations à résoudre, la performance apportée est meilleure, car les effets géométriques (DOP) deviennent plus favorables et améliorent la précision de la position ainsi calculée.

Calcul de la position

Le calcul de la position du récepteur est généralement effectué au moins toutes les secondes. Le récepteur intègre pour cela un logiciel de calcul, qui effectue différentes opérations à chaque instant t_m (instant de mesure).

Calcul de la position des satellites

Les éphémérides diffusées par chaque satellite donnent la forme de l'orbite (trajectoire) suivie par ce satellite. À partir des ces éphémérides, le récepteur peut restituer la position P_{sat} du satellite à l'instant t_e de l'émission du signal sur lequel a été réalisée la mesure de distance.

Calcul de la mesure de distance

La mesure de distance brute D est établie en multipliant le délai de propagation $(t_m - t_e)$ par la vitesse de la lumière c (vitesse de propagation du signal) :

$$D = (t_m - t_e)\,c$$

Cependant, nous avons vu que cette mesure était entachée d'erreurs et qu'elle devait être corrigée, en particulier des délais ionosphériques et troposphériques et des erreurs de synchronisation de l'horloge du satellite :

$$D = (t_m - t_e)\,c + \text{corrections}$$

Solution de navigation

Consiste à résoudre simultanément les quatre équations qui relient les quatre mesures de distances (entre le récepteur et les quatre satellites utilisés) et les positions du satellite et du récepteur. En notant la position du récepteur $P(x,y,z)$ pour indiquer les trois paramètres inconnus de la position, chacune des quatre équations peut s'écrire, pour le satellite i, de la façon suivante :

$D\mathrm{i} = P(x,y,z) - P_{sat_i}$

Cependant, nous avons vu que la mesure de distance était fondée sur la mesure, par rapport au temps de l'horloge locale, de l'instant d'arrivée du signal. Cette mesure est donc biaisée du fait que l'horloge locale du récepteur n'est pas synchronisée par rapport au temps système utilisé par tous les satellites pour synchroniser l'émission et la datation de leurs signaux.

Ce biais peut s'écrire $(t_{récepteur} - t_{système})\,c$, ou $dt\mathrm{c}$. En compensant la mesure de distance par cet écart de synchronisation, les équations de mesure des distances pour les quatre satellites s'écrivent :

$$D_1 = P(x,y,z) - P_{sat_1} - dt\mathrm{c}$$

$$D_2 = P(x,y,z) - P_{sat_2} - dt\mathrm{c}$$

$$D_3 = P(x,y,z) - P_{sat_3} - dt\mathrm{c}$$

$$D_4 = P(x,y,z) - P_{sat_4} - dt\mathrm{c}$$

Dans ce système d'équations, les quatre inconnues sont x, y, z et dt.

La résolution de ce système d'équations est effectuée à chaque instant par le récepteur. C'est ce qu'on appelle le *calcul du point,* qui donne la position du récepteur (x, y, z). Le calcul donne également accès à dt, qui représente en fait l'écart de synchronisation du récepteur par rapport au temps système.

Dans le cas de récepteurs utilisant de nombreux canaux, le nombre de satellites utilisés est plus important que le nombre minimal de quatre. Il est possible d'utiliser des algorithmes de calcul pour prendre en compte les effets de différentes erreurs sur la mesure de distance. Les satellites à basse élévation (sur l'horizon), par exemple, étant davantage soumis aux erreurs de mesures que les autres (plus de multitrajets, erreurs troposphériques et ionosphériques plus importantes), l'algorithme de calcul leur donne automatiquement moins d'importance dans le calcul de la position. C'est ce qu'on appelle le calcul de position pondéré, qui améliore la précision du service.

Dans le cas où le message de navigation inclut des informations complémentaires, comme les données d'intégrité fournies par le service SoL (Safety of Life) de Galileo, le processeur du récepteur peut évaluer l'incertitude du calcul de position. Cela consiste à déterminer un *rayon de protection* autour de cette position et à s'assurer que l'erreur éventuelle n'est pas plus importante que ce rayon de protection. Cette information de qualité du service de positionnement est essentielle pour certaines applications, notamment la navigation aérienne.

Acquisition et temps de premier fix

Lors de la mise en marche d'un récepteur GPS ou Galileo, celui-ci ne fournit sa première position qu'après un certain délai. Ce temps d'attente, appelé *temps de premier fix,* peut varier de quelques secondes à quelques minutes.

L'acquisition peut être plus ou moins longue selon la durée pendant laquelle le récepteur n'est pas encore en état de fonctionner. Le temps de démarrage de ce dernier dépend de la disponibilité de données récentes diffusées par les satellites, appelées *données de contexte.* On parle communément de démarrage à froid ou à chaud. Comme indiqué précédemment, le temps d'acquisition dépend également des caractéristiques intrinsèques du récepteur (nombre de corrélateurs, sensibilité, etc.).

Le temps de premier fix est lié aux deux conditions suivantes, qui doivent être remplies afin que le récepteur puisse élaborer sa solution de navigation :

- acquisition des signaux et des mesures de code ;
- acquisition des données de navigation et des éphémérides satellite.

Acquisition et poursuite des signaux

L'acquisition du signal, ou *signal lock,* se réalise lorsque le récepteur effectue la corrélation entre la modulation de code du signal reçu et la modulation de code qu'il génère lui-même. Pour cela, le récepteur doit ajuster les deux paramètres suivants :

- Le décalage Doppler de la porteuse, selon lequel le signal reçu au niveau du récepteur apparaît avec une fréquence différente de celle du signal émis par le satellite *(voir encadré).*

- Le décalage temporel du code, dont la détermination est l'objet de l'opération de corrélation.

La recherche de l'acquisition d'un satellite s'effectue donc selon deux dimensions, comme l'illustre la figure 2.3. C'est la fonction des boucles d'acquisition du récepteur. On peut remarquer que la présence de signaux parasites peut entraîner des erreurs d'acquisition, ou *false locks.*

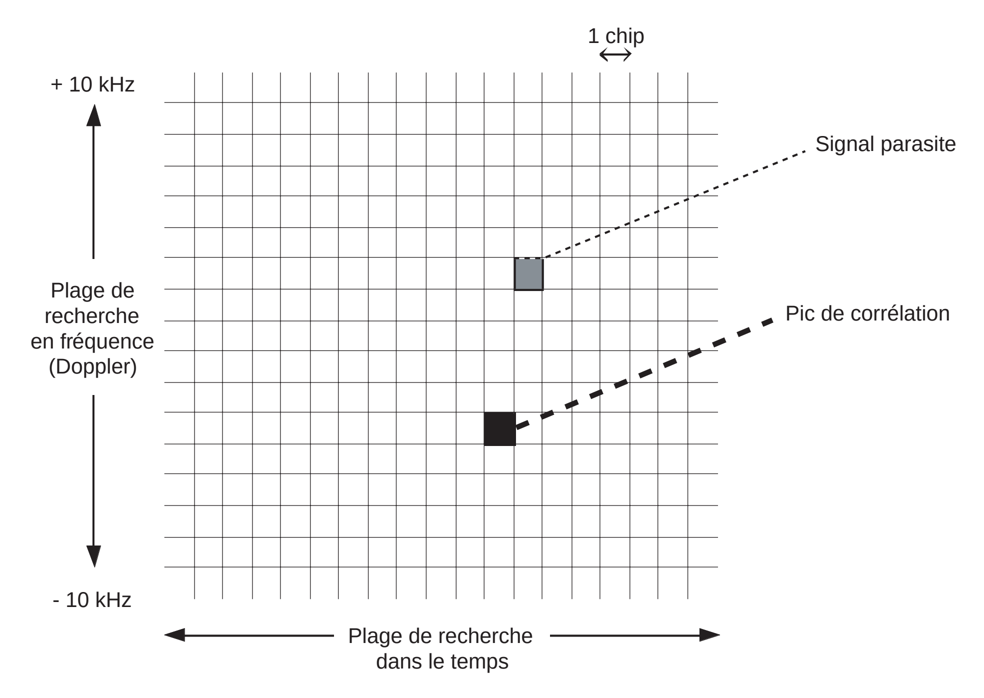


Figure 2.3
Recherche de l'acquisition du signal

Une fois l'acquisition réalisée, le récepteur continue à « poursuivre » le signal en ajustant en permanence le décalage Doppler et l'avance ou le retard temporel de la modulation de code. Pour chaque satellite, il génère en permanence au moins trois codes, décalés dans le temps. En analysant les propriétés de corrélation du code reçu par rapport à ces trois codes générés en interne, il est capable de s'ajuster et de suivre les variations de distance entre le satellite et le récepteur, et donc les variations d'avance ou de retard des modulations de code reçues dans le signal. Les récepteurs modernes utilisant plus de trois corrélateurs, on parle de *multicorrélation.*

Grâce aux nouvelles technologies disponibles aujourd'hui, le nombre de corrélateurs n'est plus vraiment limité. Cela permet de développer des techniques de corrélation plus

sophistiquées, plus robustes et performantes, permettant, par exemple, de mieux rejeter les signaux parasites et ainsi d'améliorer la précision de la mesure.

Effet Doppler

La meilleure illustration de l'effet Doppler est fournie par le son d'une voiture en mouvement : lorsque la voiture s'approche de nous, le son émis par son moteur paraît plutôt aigu ; il nous semble normal quand elle passe à notre hauteur et nous paraît plus grave lorsqu'elle s'éloigne. Le son aigu correspond à des vibrations sonores de fréquences plus élevées, et le son grave à des vibrations sonores de fréquences moins élevées.

Il en va de même pour un satellite. Quand il se lève au-dessus de l'horizon, son mouvement le rapproche du récepteur, et le signal est reçu par ce dernier à une fréquence plus élevée que lorsqu'il descend sur l'horizon et s'éloigne du récepteur.

La raison de ce phénomène est illustrée à la figure 2.4. La porteuse du signal est constituée d'une ondulation périodique se déplaçant du satellite vers le récepteur. En prenant l'exemple de la fréquence L1 (1 575 MHz), une ondulation complète, ou période, dure environ 0,6 milliardième de seconde. Pendant ce laps de temps, le signal se propage sur une distance d'environ 20 cm (la longueur d'onde). Cependant, pendant ce même laps de temps, le satellite se déplace également en direction de l'utilisateur.

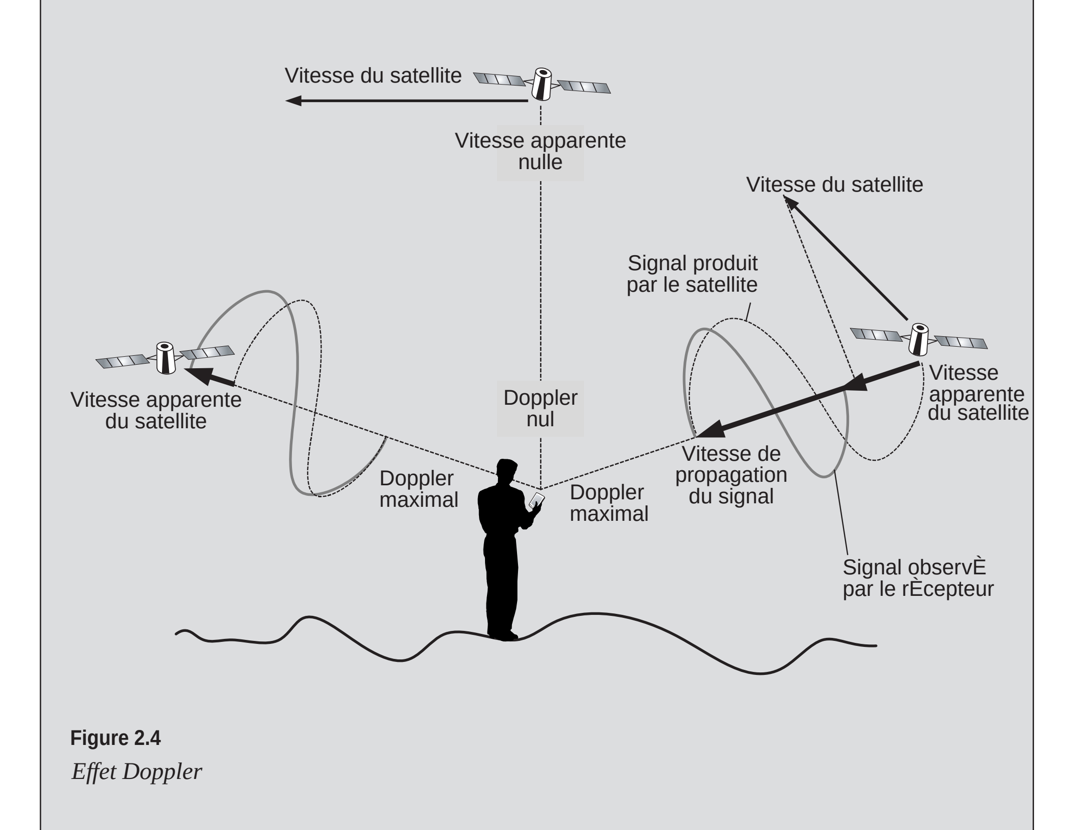


Figure 2.4
Effet Doppler

En se rapprochant du récepteur à une vitesse maximale de 1 km/s, il parcourt jusqu'à 0,6 micromètre (0,6 micron). Vue du récepteur, la distance entre le début et la fin de la période de l'ondulation est donc diminuée de la distance parcourue par le satellite. La longueur d'onde du signal reçu par le récepteur apparaît en conséquence diminuée d'environ 0,6 micron. Cela représente une augmentation de la fréquence L1 d'environ 5 kHz. Inversement, lorsque le satellite s'éloigne du récepteur en redescendant sur l'horizon, sa fréquence apparaît plus faible de quelques kilohertz.

La vitesse apparente du satellite par rapport à l'utilisateur varie tout au long de sa période de visibilité, passant de +1 km/s au maximum au lever du satellite, à une valeur nulle quand le satellite est au plus haut sur l'horizon, puis à – 1 km/s quand il se couche. L'effet Doppler varie donc également, imposant au récepteur de suivre ces variations de fréquences pendant toute la phase de poursuite du satellite.

Acquisition des données de navigation

Après avoir effectué les opérations d'acquisition du signal permettant la corrélation du code, le récepteur peut commencer à extraire les données de navigation modulées en superposition de la modulation de code.

En ce qui concerne le temps de premier fix, les données importantes à considérer sont les almanachs et les éphémérides. Ces données sont généralement structurées en messages, transmis et répétés selon une trame bien définie.

La structure de cette trame et la fréquence de répétition des messages déterminent le temps que doit attendre le récepteur pour recueillir l'ensemble des éphémérides des satellites qu'il poursuit.

Typiquement, le récepteur doit attendre environ 30 s pour obtenir les éphémérides complètes d'un satellite GPS ou Galileo.

Ces données ont des durées de validité différentes. Les almanachs sont normalement utilisables pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, même si, avec le temps, ils perdent en précision et ne reflètent plus l'état exact de la constellation. Les éphémérides ne sont valables que pendant quelques heures (les éphémérides satellite GPS changent après une période de une à quatre heures).

Démarrages à froid et à chaud

En fonction des données de navigation, dites « de contexte », disponibles au niveau du récepteur lors de son démarrage, on distingue deux types de démarrage : à froid et à chaud.

Dans le cas du démarrage à froid, ou *cold start,* le récepteur ne dispose pas d'informations pouvant l'aider à acquérir les signaux. On parle en ce cas d'acquisition « en aveugle » puisque le récepteur ne sait pas où se trouvent les satellites et ignore donc quels sont les satellites en vue et quel effet Doppler est appliqué à leur signal. Il doit effectuer sa

recherche sur plusieurs codes et sur une grande plage de décalages Doppler possibles, ce qui prend de vingt à trente minutes.

Dans le cas d'un démarrage à chaud, le récepteur dispose d'un contexte. Ce dernier consiste en un certain nombre de paramètres d'initialisation disponibles en interne (almanach mémorisé et encore valide au démarrage, connaissance approximative du temps système ou de la position du récepteur, par exemple) ou en externe, *via* des techniques dites LBS (Location Based Services). Ces techniques consistent à intégrer les récepteurs GPS avec un téléphone mobile, qui peut dès lors recevoir les almanachs ou les messages de navigation courants, qui sont transmis par des stations relais. Dans ce cas, le temps d'acquisition est de l'ordre de quelques dizaines de secondes

Ces paramètres permettent de prédire les satellites en visibilité, de mieux cibler la recherche et donc de réduire le temps d'acquisition. On parle aussi de démarrage « à chaud » (*warm start),* ou de redémarrage *(restart) :*

- Démarrage « à chaud » *(warm start) :* le récepteur étant allumé après plusieurs heures ou plusieurs jours sans utilisation, les éphémérides qu'il a gardées en mémoire ne sont plus valables, mais il peut toujours utiliser les almanachs, qui restent utilisables plusieurs semaines.
- Redémarrage *(restart) :* le récepteur est allumé ou sort d'une zone de masquage alors qu'il a en mémoire des éphémérides récentes, datant de moins d'une heure.

Effets du nombre de corrélateurs

La capacité de recherche du récepteur est limitée par le nombre de corrélateurs dont il dispose. Les récepteurs comprenant un nombre très important de corrélateurs peuvent les utiliser pour paralléliser les boucles d'acquisition et accélérer ainsi fortement la phase de recherche.

Les récepteurs grand public sont désormais couramment équipés de centaines de milliers de corrélateurs.

Les catégories de récepteurs

Les constructeurs de récepteurs ont développé une vaste gamme d'équipements, dont les caractéristiques sont adaptées à de nombreux domaines d'application.

Les sections qui suivent proposent une typologie des principaux récepteurs dans différentes catégories d'usage : récepteurs grand public, récepteurs certifiés pour les transports, récepteurs de qualité géodésique et récepteurs militaires.

D'autres types de récepteurs sont en outre dédiés à des usages spécifiques, comme les récepteurs embarqués à bord des satellites, qui échappent à ces catégories.

Les récepteurs grand public

Les récepteurs grand public ont été développés à l'origine pour utiliser la constellation GPS seule et la fréquence L1 uniquement (code C/A), seule fréquence du GPS disponible pour les usages civils. Ils sont généralement conçus pour apporter une précision horizontale de l'ordre d'une dizaine de mètres, qui est atteinte en utilisant une douzaine de canaux (permettant de recevoir tous les satellites GPS en vue).

La taille de ces récepteurs s'est sensiblement réduite depuis quelques années, du fait de la miniaturisation des puces électroniques, où se trouvent les fonctions de traitement numérique du signal et de calcul de la position, qui atteignent aujourd'hui des tailles inférieures au centimètre.

Au-delà de la précision, les performances recherchées sont la robustesse du service dans des environnements où les satellites sont susceptibles d'être masqués (zones urbaines, indoor) et la rapidité de fourniture du positionnement.

Un récepteur GPS grand public moderne comporte typiquement les caractéristiques suivantes :

- 12 canaux ;
- plusieurs milliers, voire centaines de milliers, de corrélateurs ;
- entre 10 et 30 s de temps de premier fix à chaud.

Selon leur usage, on distingue plusieurs types de récepteurs commercialisés, dont les plus courants sont les suivants :

- **Récepteurs embarqués.** Destinés à être fixés à un tableau de bord de voiture ou de bateau, ces récepteurs sont généralement reliés à une source d'alimentation électrique du véhicule. Ils peuvent parfois utiliser d'autres informations de navigation, comme la vitesse fournie par le compteur de vitesse d'une automobile. Généralement dotés d'un écran à cristaux liquides et de systèmes de cartes digitales, ils guident le conducteur pas à pas en calculant un itinéraire jusqu'à la destination souhaitée et en indiquant les directions à suivre, de manière visuelle et vocale. Le récepteur fonctionne en combinaison avec une base de données préalablement chargée pour dériver les instructions de guidage à partir de la position calculée par le récepteur.
- **Récepteurs portables autonomes.** À peine plus grands et plus lourds qu'un téléphone mobile, ces récepteurs sont munis d'un écran de petite taille. Ils fonctionnent à l'aide de piles ou d'une batterie rechargeable, ainsi que d'une base de données cartographique préalablement chargée. Ils sont principalement utilisés en randonnée
- **Récepteurs associés à un PDA ou à un SmartPhone.** Les assistants numériques, véritables mini-ordinateurs portables, permettent de mettre à disposition du récepteur des capacités accrues en terme de stockage de données (pour les cartes et modèles de

terrain) et de puissance de calcul (pour l'utilisation de logiciels de cartographie). Dans le cas d'un terminal communicant hybride PDA/téléphone ou d'un SmartPhone, l'utilisateur a la possibilité d'accéder à une grande variété de services LBS combinant positionnement et communication grâce à une connexion Internet par le biais du réseau de téléphonie mobile GPRS ou UMTS. Il est, par exemple, possible d'avoir accès à un service permettant de calculer des itinéraires en fonction de centres d'intérêt choisis par l'utilisateur, en prenant en compte les infos trafic locales et en bénéficiant d'une cartographie toujours à jour dans tous les pays du monde. Dans ce cas, la puissance de calcul et les temps d'accès sont des caractéristiques essentielles pour permettre l'interaction et l'échange de données avec des services externes en temps réel.

La figure 2.5 donne des exemples de récepteurs GPS grand public, avec, de gauche à droite, un récepteur destiné à être embarqué dans une voiture, un récepteur portable autonome et un récepteur prêt à être intégré, par exemple dans un téléphone mobile, dont les dimensions sont inférieures à 3 cm.



Figure 2.5
Exemples de récepteur GPS grand public

Le logiciel de cartographie est un élément important du récepteur grand public. Le volume des données traitées peut être très important. Si, pour la France, une cartographie peut être stockée sur des cartes mémoire de 256 ou 512 Mo, pour la cartographie d'une vingtaine de pays européens, les constructeurs doivent doter leurs produits d'un mini-disque dur de quelques gigaoctets.

Fabricants et éditeurs de solutions GPS mettent à jour régulièrement leurs logiciels et bases de données de cartographie, généralement sur une base annuelle.

Les récepteurs certifiés pour les transports

On parle généralement de récepteur « embarqué » dans le cas des applications de transport. Ces applications engageant la sécurité des biens et des personnes transportées, ainsi que la responsabilité des transporteurs, ces récepteurs sont soumis à de fortes contraintes de sûreté de fonctionnement et ne sont proposés qu'après certification par une autorité de contrôle.

Chaque domaine de transport est ainsi contrôlé par une *autorité de certification*, qui assure que les équipements et services de navigation sont conformes aux normes de sécurité en vigueur. Par exemple, dans le domaine du transport aérien, ce rôle est rempli par les autorités nationales de l'aviation civile, comme la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) en France ou la FAA (Federal Aviation Administration) aux États-Unis.

Les récepteurs ne sont certifiés conformes que pour une utilisation donnée. Par exemple, certains récepteurs peuvent être certifiés pour la navigation aérienne en zone océanique, mais pas pour des phases d'approche, d'atterrissage ou de déplacements au sol.

La figure 2.6 illustre un récepteur Topstar 2020 intégré dans un MMR (Multi-Mode Receiver) utilisé sur Airbus et Boeing.

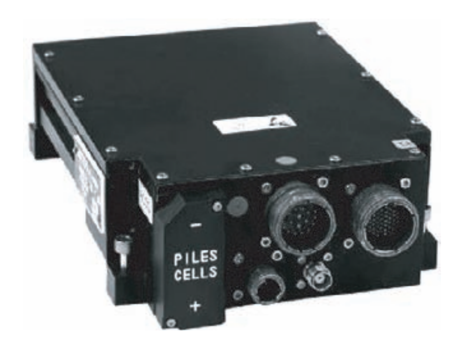


Figure 2.6
Récepteur Topstar 2020 (source Thales Avionics)

Au-delà du récepteur lui-même, il s'agit de certifier un service de positionnement utilisant non seulement un récepteur, mais l'ensemble du système de navigation par satellite permettant au récepteur de se positionner. C'est la raison pour laquelle des services dits d'intégrité doivent garantir la précision du positionnement. Par exemple, les systèmes EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ou WAAS (Wide Area Augmentation System) contrôlent en permanence les satellites GPS et avertissent en temps réel l'ensemble des récepteurs de type EGNOS ou WAAS en cas de défaillance ou de dégradation du système GPS. C'est également le cas du service SoL (Safety of Life) de Galileo.

Les différents types de récepteurs certifiés pour les applications de transport sont les suivants :

- **Récepteurs avec intégrité autonome (RAIM).** Ces récepteurs sont utilisés pour des phases de transport ne nécessitant pas une précision très importante, comme la navigation en phase océanique, pour laquelle une précision de 100 m est largement suffisante, et dont les conditions de visibilité des satellites sont très bonnes. Une technique telle que le RAIM (Ranging Autonomous Integrity Monitoring) permet aux récepteurs de détecter de façon autonome l'apparition d'un dysfonctionnement ou d'une forte dégradation de performance d'un satellite défectueux *(voir encadré)*.

  Ces récepteurs peuvent être plus ou moins complexes et performants. Les plus simples sont conçus pour recevoir une seule fréquence en provenance des satellite GPS (signal L1 C/A) ou Galileo (signal E5a ou L1) et sont équipés d'une dizaine de canaux de réception pour acquérir l'ensemble des satellites GPS ou Galileo en visibilité. Les plus complexes peuvent être conçus pour recevoir deux fréquences (récepteurs *bifréquence*) en provenance de chaque satellite des deux constellations (récepteurs *combinés* GPS/Galileo). Dans la mesure où l'utilisation combinée des constellations indépendantes GPS et Galileo renforce considérablement la fiabilité du positionnement, les récepteurs combinés GPS/Galileo utilisant le RAIM pourront être utilisés dans des phases de navigation plus exigeantes.

- **Récepteurs utilisant une augmentation régionale ou locale.** Ces récepteurs sont utilisés pour des phases de transport pour lesquelles la précision et l'intégrité exigées sont très importantes. C'est le cas des phases d'approche et d'atterrissage dans la navigation aérienne. Ces récepteurs utilisent, en plus des signaux GPS ou Galileo, une source indépendante d'information garantissant les performances du service. Ces informations sont élaborées et diffusées sur une base régionale, à l'échelle d'un continent, dans le cas des systèmes d'augmentation régionaux comme EGNOS ou WAAS, ou locale, comme un aéroport, dans le cas des systèmes d'augmentation locaux LADGNSS (Local Area Differential GNSS). Nous présentons plus en détail ces techniques et systèmes au chapitre 6.

- **Récepteurs Galileo SoL.** Le système Galileo est conçu pour fournir un service, appelé SoL (Safety of Life), dont les performance sont contrôlées en temps réel et garanties par des moyens de mesure indépendants. Les récepteurs associés sont bifréquence (écoutant les signaux L1 et E5b) et sont typiquement équipés de 12 canaux, permettant de recevoir tous les satellites Galileo en visibilité. Ils fournissent une alerte en moins de 6 s en cas de dégradation inacceptable des performances de positionnement. Le système GPS prévoit également, dans une version modernisée en cours de définition, de mettre en place un tel service, utilisant les fréquences L1 et L5.

Le RAIM (Ranging Autonomous Integrity Monitoring)

Le RAIM est une technique de calcul implémentée dans le calculateur du récepteur afin de détecter l'apparition d'une dégradation de la précision de la mesure de distance en provenance d'un satellite parmi tous les satellites visibles. Il s'appuie sur la disponibilité d'un excédent de mesures en provenance des satellites du fait que les constellations GPS ou Galileo offrent de façon quasi permanente un nombre de satellites en visibilité supérieur à quatre. Le récepteur peut dès lors établir plusieurs solutions de positionnement, avec plusieurs combinaisons de satellites comptant au moins quatre satellites. En comparant les résultats fournis, il peut identifier la présence de mesures de distance défectueuses en provenance d'un satellite. Ce principe est illustré à la figure 2.7.

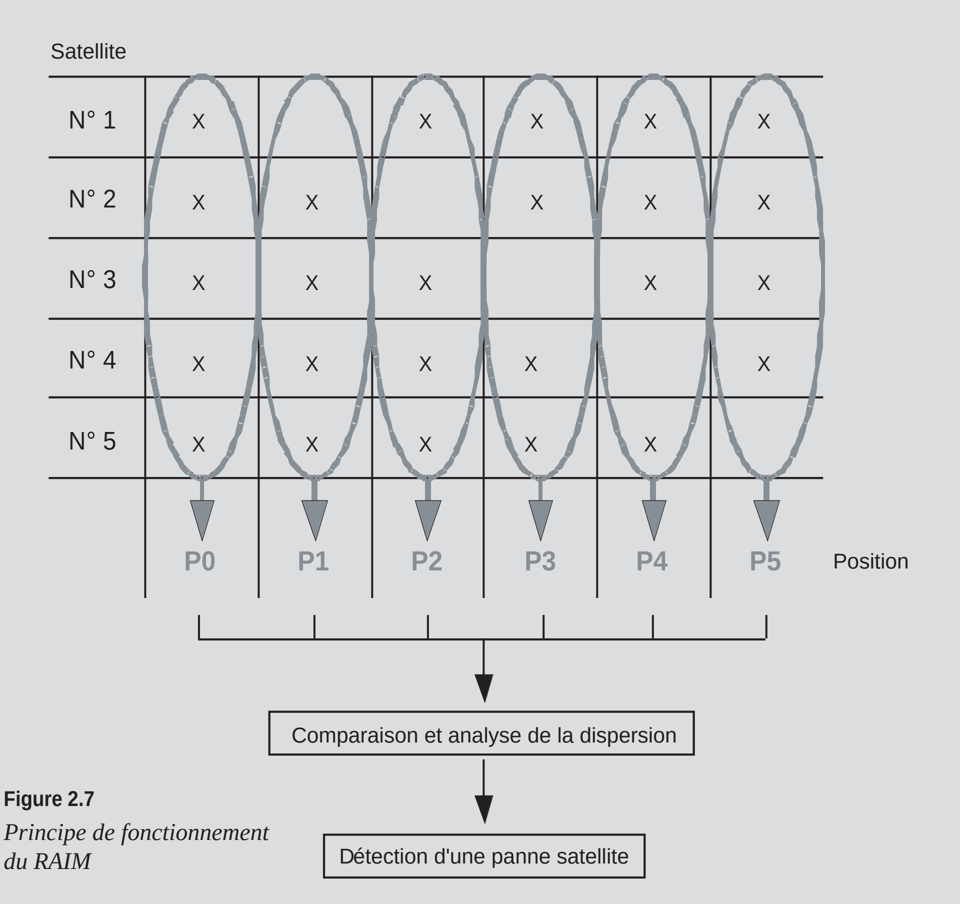


Figure 2.7
Principe de fonctionnement du RAIM

Il est possible de détecter de la sorte des erreurs en provenance d'un satellite aussi bien que des effets atmosphériques ou des multitrajets exceptionnellement importants affectant un satellite. Schématiquement, cinq satellites permettent de détecter une anomalie, et six d'isoler le satellite fautif et de l'extraire du calcul de positionnement.

Les récepteurs de qualité géodésique

Certaines applications nécessitent une précision de positionnement très importante, typiquement de l'ordre du centimètre. C'est le cas en particulier des applications géodésiques, qui visent à établir des cartes terrestres d'une grande précision ou à étudier des mouvements lents et faibles, comme les dérives des continents ou les mouvements le long de failles à haut risque d'activités sismiques. C'est le cas également des applications associées aux transferts de temps afin d'obtenir des synchronisations très précises entre des lieux éloignés.

Ce type d'application s'appuie sur des récepteurs essentiellement statiques, qui mettent en œuvre un ensemble de techniques permettant de réduire le plus possible les erreurs résiduelles.

On trouve des récepteurs de ce type dans les systèmes GPS et Galileo eux-mêmes. En effet, comme nous l'avons vu, les système GPS ou Galileo doivent déterminer à quelques centimètres près la position des satellites, ce qui exige le déploiement de récepteurs de qualité « géodésique » sur l'ensemble du globe.

La figure 2.8 donne un schéma de récepteur géodésique qui sera déployé dans le système sol de Galileo. Il a la particularité d'être équipé d'une horloge atomique ultrastable afin d'améliorer la précision de calcul des positions et de la synchronisation des satellites Galileo.

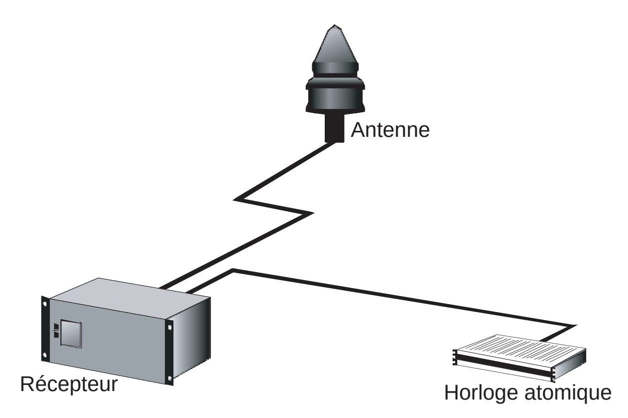


Figure 2.8

Schéma de récepteur géodésique du segment sol de Galileo (source Alcatel Alenia Space)

Ces récepteurs permettent de mettre en œuvre des techniques élaborées de mesures de distance et de positionnement, notamment les mesures de phase et les techniques différentielles.

Mesures de phase

Nous avons vu comment les mesures de distance étaient réalisées à partir de la mesure du temps de propagation des codes GPS ou Galileo entre le satellite et le récepteur.

Pour cela, le récepteur effectue une opération de corrélation consistant à faire coïncider dans le temps le code reçu depuis le satellite et le code produit en interne par le récepteur. Le signal GPS ou Galileo permet également de mesurer un écart entre les ondulations de la porteuse du signal reçu (la phase du signal reçu) et les ondulations de la porteuse du signal générée en interne par le récepteur (la phase du signal généré en interne). Le grand avantage de cette mesure d'écart de phase est sa précision, qui est de l'ordre de quelques millimètres, à comparer à la précision de corrélation du code, qui est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. Cette mesure de phase est toutefois ambiguë, en ce qu'elle ne permet pas de connaître le nombre entier d'ondulations entre le satellite et le récepteur, qui est nécessaire pour déterminer la distance entre le satellite et le récepteur.

Il est possible de lever cette ambiguïté de la mesure de phase grâce à l'accumulation de mesures de code et de phase. Cela permet à un récepteur doté de cette technique d'obtenir des précisions de mesures de distance (hors erreurs de propagation atmosphérique et de positions des satellites) largement inférieures au centimètre.

La figure 2.9 illustre l'amélioration de la précision des mesures de distance apportée par les mesures de phase.

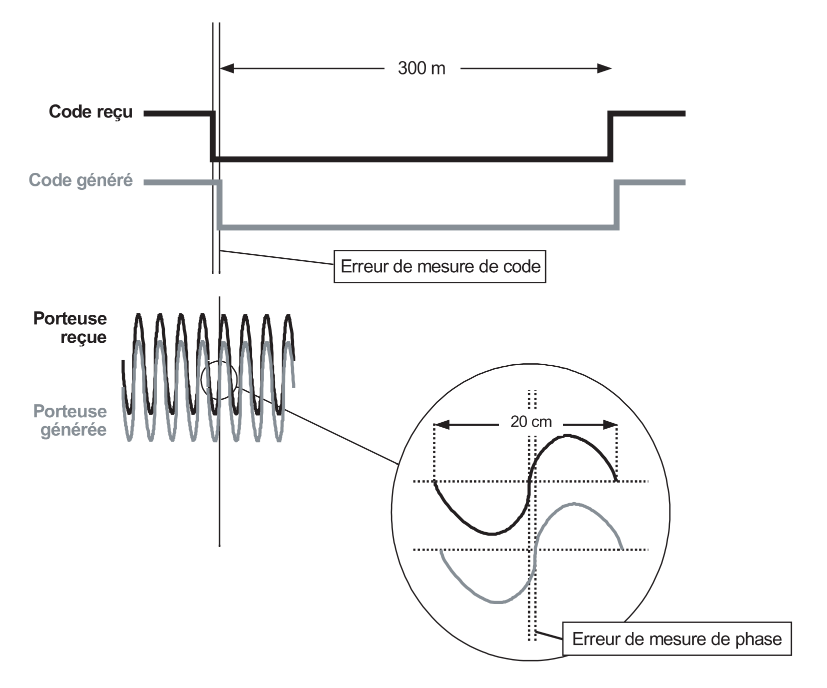


Figure 2.9

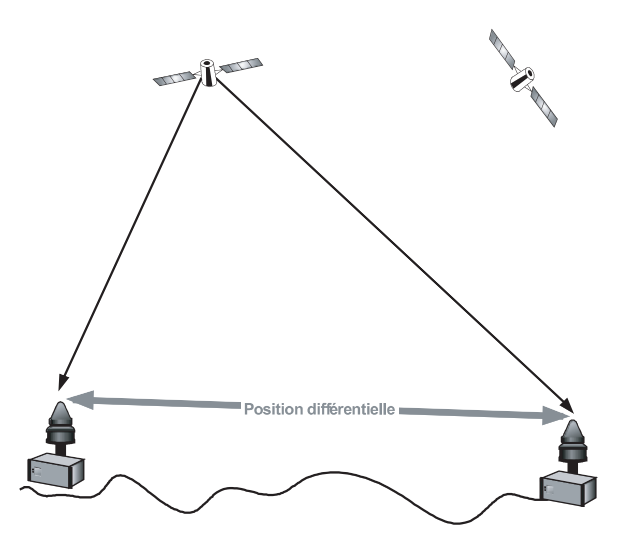
La mesure de phase

Techniques différentielles

Ces techniques permettent d'éliminer une grande part des sources d'erreur de mesure grâce à l'utilisation de plusieurs récepteurs et à la combinaison de leurs mesures. Il est de la sorte possible de positionner les récepteurs les uns par rapport aux autres avec une précision centimétrique, voire millimétrique. Ces techniques sont utilisées en géodésie afin d'établir des positions de points de référence avec une très grande précision. Il est possible, par exemple, de déterminer les mouvements tectoniques le long des failles pour mieux anticiper des séismes potentiels ou bien de surveiller les déformations de grandes structures, comme les ponts ou barrages.

La technique différentielle dite des « simples différences » consiste à combiner les mesures de deux récepteurs par rapport à un même satellite, comme l'illustre la figure 2.10. La différence de ces deux mesures de distance permet d'éliminer les sources d'erreurs en provenance du satellite. L'erreur due à l'écart de synchronisation du satellite par rapport au temps système est annulée puisqu'elle s'applique de la même façon sur les deux mesures. L'erreur de positionnement du satellite est également annulée dans le cas où les deux récepteurs sont proches (l'effet de l'erreur dans la direction satellite-récepteur est le même) ou à tout le moins fortement diminuée dans le cas où les récepteurs sont éloignés. Les erreurs de propagation atmosphérique sont également compensées dans le cas où les deux récepteurs sont proches et soumis aux mêmes erreurs de propagation. Cependant, les erreurs liées au récepteur lui-même, et en particulier à l'instabilité de son horloge, ne sont pas annulées.

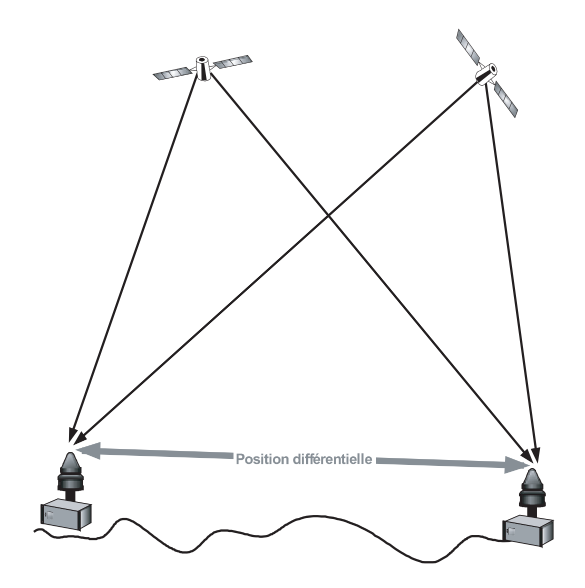
Figure 2.10
Technique différentielle dite des simples différences



La technique dite des « doubles différences » permet de s'affranchir des erreurs liées aux horloges des récepteurs. Avec cette technique, ce sont les mesures entre deux récepteurs

et deux satellites qui sont soustraites les unes des autres, comme l'illustre la figure 2.11, supprimant les erreurs provenant des satellites et des horloges récepteur.

Figure 2.11
Technique différentielle dite des doubles différences

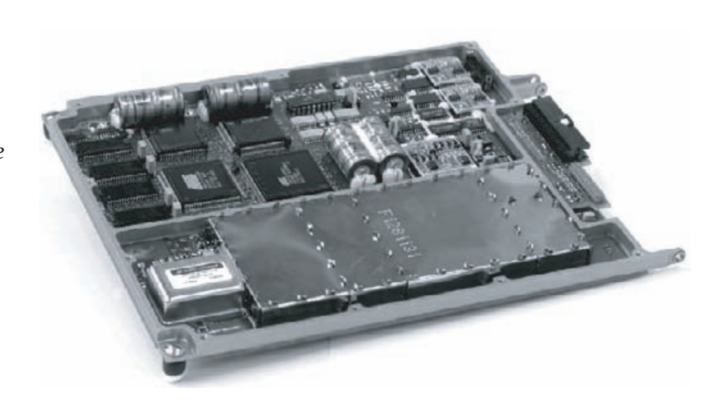


Les récepteurs militaires

À l'origine, le système GPS a été conçu pour répondre au besoin des armées américaines de disposer d'un positionnement de l'ensemble des équipements, troupes ou armes déployées sur des terrains d'opération. Ce besoin concerne aussi bien les armées de terre, la marine ou l'aviation. Il existe une grande variété de récepteurs GPS développés pour de tels besoins et contraintes spécifiques des applications militaires.

La figure 2.12 illustre l'intérieur d'un récepteur GPS militaire.

Figure 2.12
Intérieur d'un récepteur GPS militaire PPS Topstar 100-2 utilisé sur avion Transall et hélicoptère Tigre (source Thales Avionics)



Ces récepteurs doivent opérer dans des environnements extrêmement hostiles, qui induisent des caractéristiques spécifiques, notamment les suivantes :

- Ces équipements faisant partie du système d'arme, leur accès doit être contrôlé. Les systèmes GPS et bientôt Galileo disposent de signaux réservés pour ces applications, auxquels l'accès n'est possible que par le biais d'un code de décryptage.
- Afin de faire face à la « guerre électronique » sur un théâtre d'opération, ces récepteurs doivent être extrêmement résistants au brouillage. Les codes des signaux dédiés à ces applications ont été spécialement conçus pour apporter une résistance accrue au brouillage et aux mauvaises conditions de réception.
- Les récepteurs embarqués sur des systèmes d'armes, comme les missiles, sont soumis à des accélérations et à des vitesses très importantes. La conception de leurs systèmes d'acquisition et de poursuite des signaux est adaptée à ces conditions.
- Afin d'assurer une continuité précise du positionnement en cas de masquage ou de brouillage, les récepteurs peuvent être « aidés », c'est-à-dire couplés à d'autres équipements de navigation leur permettant de réacquérir très rapidement les signaux de satellites perdus. Dans l'aviation, le couplage des récepteurs GPS avec des centrales à inertie, fournissant une position continue mais dont la précision se dégrade avec le temps, permet d'améliorer sensiblement les performances de robustesse et de précision de chacun de ces systèmes lorsqu'ils sont utilisés de façon isolée.

Conclusion

Nous avons parcouru les différents types de récepteurs pour la navigation par satellite. Au-delà des techniques de base qui sont communes à tous ces récepteurs, ce sont les types d'applications qui constituent les véritables différentiateurs entre tous ces équipements de réception.

Le chapitre suivant élargit notre aperçu pour aborder la grande diversité de ces applications.

3

Les applications

Le GPS et, bientôt, Galileo apportent la capacité à localiser en permanence et avec une précision inégalée l'ensemble des lieux de la surface terrestre. À chaque lieu du globe, que ce soit sur terre, en mer ou dans le ciel, peut être associée une position établie par ces systèmes. Cette nouvelle technologie permet en quelque sorte de cataloguer l'espace, avec une précision et une globalité jusqu'alors inconnues. Les coordonnées GPS ou Galileo forment de la sorte un nouveau type d'adressage géographique, à vocation universelle.

Ces nouvelles possibilités ouvrent la voie à de nouvelles applications, d'une grande variété. Ce chapitre présente les principaux domaines de ces applications en développement à ce jour, sans viser toutefois à l'exhaustivité.

Le marché des équipements et services de navigation par satellite est en constante évolution chaque année, avec un taux annuel de croissance proche de 25 %. Cette tendance est sans doute largement corrélée avec la baisse constante du prix et de la taille des récepteurs GPS, mais également avec l'apparition d'applications de plus en plus nombreuses dans des domaines très variés et avec l'intégration des récepteurs GPS dans les téléphones mobiles, les mini-ordinateurs personnels (PDA) et les automobiles.

Avec environ 15 millions de voitures vendues en Europe tous les ans et plus d'un milliard de téléphones mobiles en service dans le monde, le développement des applications de masse du GPS est devenu une réalité.

Les services fondés sur la localisation (LBS)

Les services fondés sur la localisation, ou LBS (Location Based Services), comprennent tous les services pour lesquels la connaissance de la position de l'utilisateur est nécessaire. Ces services reposent sur l'utilisation combinée du positionnement par satellite et des réseaux de communication mobiles GSM/UMTS. La combinaison d'un récepteur de navigation par satellite donnant la position et une datation précises de l'utilisateur avec un téléphone mobile permet d'obtenir des informations spécifiques et d'ouvrir un très large champ d'applications.

Ces deux fonctions peuvent être intégrées dans un même équipement, se présentant sous la forme d'un téléphone portable, comme l'illustre la figure 3.1.



Figure 3.1

Exemple d'équipement intégrant récepteur GPS et téléphone mobile

Les fournisseurs de services peuvent offrir une large variété de possibilités aux utilisateurs, comme de connaître l'hôpital le plus proche et le meilleur chemin pour s'y rendre. On peut étendre cet exemple aux restaurants, aux stations essence, aux parking souterrains, etc.

Les services fondés sur la localisation sont généralement segmentés en quatre grandes catégories :

- **Urgences et assistance.** Ces services d'urgence permettent de fournir la localisation d'un usager mobile ayant besoin d'assistance. Par exemple, aux États-Unis, la nouvelle norme E911 (Emergency Call 911) impose aux opérateurs de téléphonie mobile de fournir la position à moins de 50 m près des usagers qui utilisent un numéro d'appel d'urgence. D'autres applications d'assistance, comme le dépannage automobile, se développent actuellement.

- **Surveillance et gestion de flotte.** Ces services utilisent la navigation par satellite et les communications pour fournir à une entité centrale de contrôle la position d'un ensemble de porteurs de récepteurs. Des applications sont déjà en place pour permettre de localiser des enfants, des personnes âgées malades, des repris de justice en liberté surveillée ou encore des véhicules de transport de marchandises précieuses ou dangereuses et même des taxis.
- **Facturation.** Ces services permettent d'établir des facturations en fonction de la position de l'utilisateur. Des applications sont en cours d'expérimentation pour établir des factures d'autoroute pour des sociétés de transport routier. Chaque camion est équipé d'un récepteur GPS, et la facture est établie en fonction du kilométrage effectué sur les portions routières payantes.
- **Information.** Ces services fournissent directement à l'usager final des informations permettant, par exemple, de lui indiquer des centres d'intérêt se trouvant à proximité ainsi que l'itinéraire vers sa destination. Des applications sont déjà en place pour les automobiles et les particuliers, tandis que d'autres sont en expérimentation, comme l'aide vocale utilisant la position fournie par un récepteur GPS pour guider des personnes à mobilité réduite. Ces services reposent sur la mise en place de fournisseurs de contenu, c'est-à-dire d'informations localisées susceptibles d'être rapprochées de la position du récepteur utilisateur. Il s'agit pour ces fournisseurs de constituer des bases de données recensant les centres d'intérêt associés au service. On parle aussi de « système d'information terrestre ».

Les systèmes d'information terrestre

Un système d'information terrestre, ou GIS (Geographic Information System), est un système informatique capable de stocker et de gérer un ensemble de données identifiées par leur localisation. Les GIS sont couramment utilisés dans les domaines scientifiques, mais également dans les activités commerciales et de service public. Ils peuvent gérer des données d'équipement, comme les routes, et des infrastructures de réseaux publics ou permettre l'affichage de cartes digitales auprès des utilisateurs individuels ou des professionnels gestionnaires de flottes.

L'utilisation de récepteurs GPS et bientôt Galileo sur des équipements de plus en plus divers fait apparaître de nouveaux types de GIS. Par exemple, la localisation des photographies faites à partir d'un appareil photo équipé d'un récepteur GPS ou Galileo permet de constituer des bases de données d'images identifiées par leur position sur la Terre, ce qui permet d'associer une position sélectionnée sur une carte avec un ensemble de photographies disponibles.

Le développement de ces applications auprès du grand public nécessite de déployer un service de positionnement dans toutes les conditions de la vie courante, en particulier dans les conditions peu favorables au positionnement par satellite que sont l'intérieur des bâtiments ou encore les zones très urbanisées, qui présentent de nombreux masquages des satellites.

La mise en place de techniques permettant d'améliorer les performances des systèmes de navigation par satellite dans ces environnements difficiles est donc nécessaire. Communément appelées A-GNSS (Assisted-GNSS), ces techniques consistent à réaliser une hybridation des récepteurs GPS ou Galileo avec d'autres sources d'information ou de positionnement.

Techniques A-GNSS et hybridation pour les LBS

En augmentant en zone urbaine les capacités des systèmes GPS ou Galileo, il est possible à un utilisateur de se positionner dans la rue en environnement dégagé, puis dans des rues très étroites, où la visibilité des satellites est fortement réduite, et enfin à l'intérieur des bâtiments.

Le maintien du positionnement au cours de ces changements d'environnement doit se faire sans discontinuité apparente du service. Pour cela, les techniques A-GNSS recourent à un réseau local de communication capable de relayer les informations provenant des satellites eux-mêmes mais non reçues par les terminaux en environnement difficile.

Pour être utilisés pour le positionnement, les signaux GPS ou Galileo doivent être reçus pendant plusieurs dizaines de secondes, de façon à recevoir l'ensemble des données de navigation qui sont transmises à très faible débit. Le fait qu'un récepteur change rapidement d'environnement et perde régulièrement la visibilité des satellites est très pénalisant pour le maintien du service de positionnement et d'une géométrie susceptible de fournir un bon niveau de performance. Une première assistance au récepteur GNSS consiste à lui fournir instantanément les données diffusées par le satellite qui ont été perdues pendant ses périodes de non-visibilité. C'est le principe de base des techniques A-GNSS, illustré à la figure 3.2.

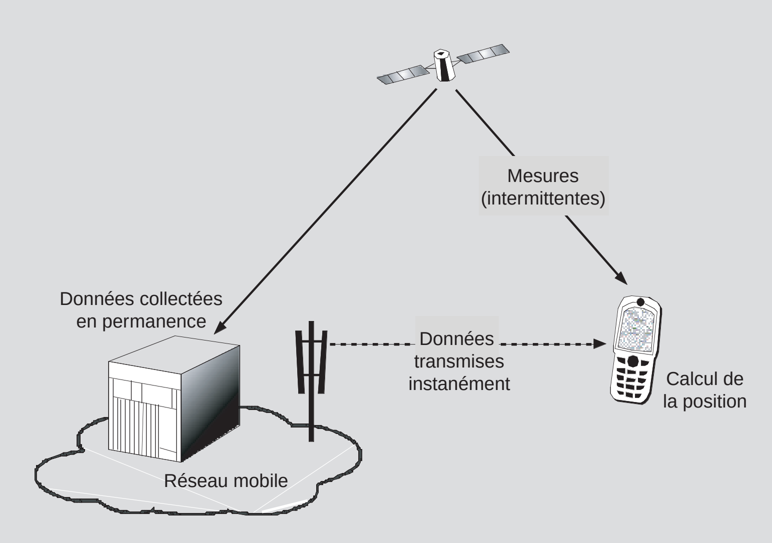


Figure 3.2

Principe de fonctionnement des techniques A-GNSS

Dans le but d'élargir encore plus le domaine d'application des services LBS, des techniques se développent pour maintenir la fourniture d'un positionnement dans des lieux très fortement masqués des satellites, comme les lieux souterrains. Comme les signaux GPS ou Galileo ne sont pas assez puissants pour traverser plusieurs niveaux de construction, il faut utiliser d'autres techniques de positionnement pour prolonger le service dans ces environnements fermés, en assurant la continuité du service de sorte que l'utilisateur ne remarque aucune transition.

Il est, par exemple, possible de recourir à la méthode classique de triangulation des réseaux de téléphonie mobile, consistant à mesurer la distance du terminal utilisateur par rapport à des relais dont la position est connue. Une telle technique n'offre qu'une précision de 100 m mais permet de maintenir le service auprès de l'utilisateur. Une autre technique s'appuie sur l'utilisation de communications Wi-Fi pour réaliser des mesures de distance par rapport à des relais de position connue. Il devient dans ce cas possible de combiner des mesures GPS ou Galileo, même en nombre insuffisant au positionnement par satellite, c'est-à-dire inférieur à quatre, avec des mesures Wi-Fi selon des algorithmes de calcul permettant de maintenir un service continu entre les zones couvertes par Wi-Fi, comme l'intérieur d'une entreprise ou d'un lieu public, et les zones non couvertes par Wi-Fi mais couvertes par GPS ou Galileo. C'est ce qu'illustre la figure 3.3.

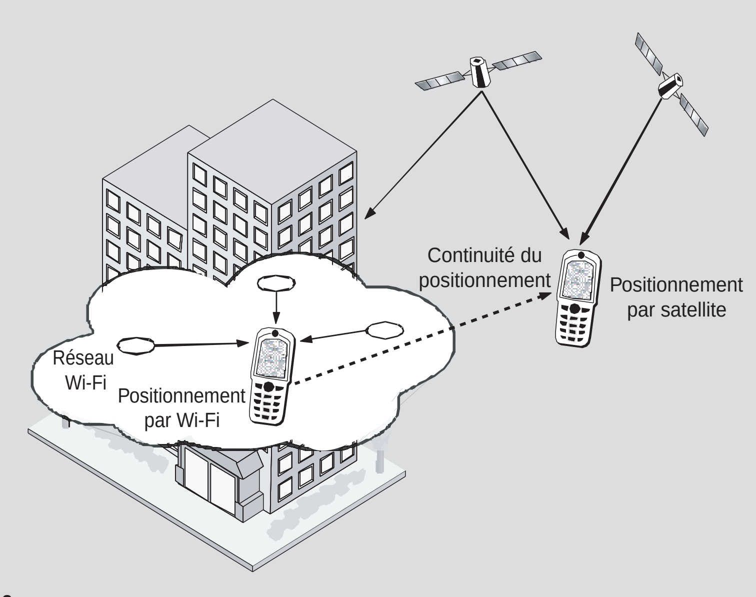


Figure 3.3

Hybridation GNSS-Wi-Fi

Les transports

Les techniques de navigation ont toujours vu leurs applications se développer dans les activités de transports. En effet, la connaissance permanente de la position d'un véhicule est nécessaire à tout déplacement, que ce soit en mer, dans les airs ou sur terre.

La navigation par satellite offre pour la première fois un système unique, disponible en permanence, utilisable pour tous les types de transport, en tout lieu de la planète. Ses applications se développent donc dans tous les domaines des transports, aérien, maritime et terrestre.

Le transport aérien

Les activités de transport aérien sont en constante progression. Un seul chiffre donne l'ampleur du phénomène : en vingt ans, le trafic aérien a doublé.

Le monde du transport aérien connaît en conséquence des besoins croissants, à la fois pour la décongestion du trafic, la sécurité des transports et la rentabilité économique. Les systèmes GPS et Galileo offrent de nouvelles possibilités pour faire face à ces demandes.

Décongestion du trafic aérien

La figure 3.4 illustre les difficultés posées par l'augmentation continue du trafic aérien.

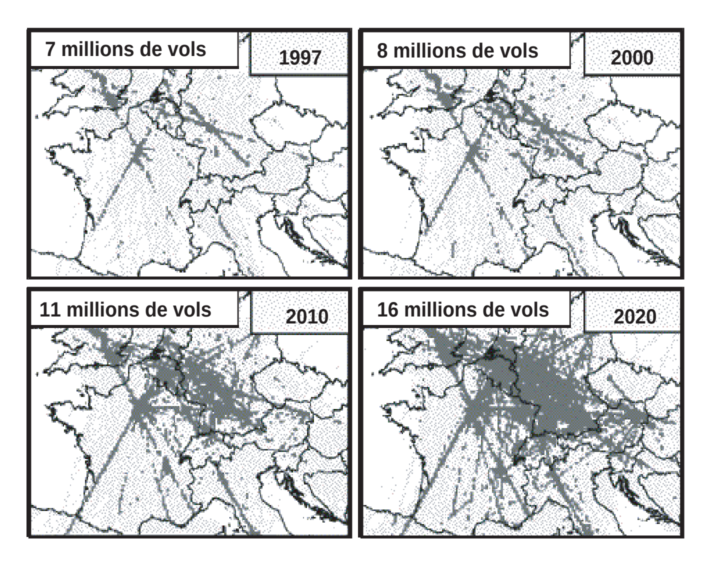


Figure 3.4
Évolution du trafic aérien en Europe

Afin d'éviter une saturation des espaces aériens, il est important de prévoir un ensemble d'améliorations, dont celle des systèmes de navigation et de contrôle du trafic.

Les systèmes actuels de navigation aérienne sont limités en terme de performance, notamment pour les raisons suivantes :

- Les systèmes qui utilisent des repères au sol, comme VOR (VHF Omnidirectional Range) ou DME (Distance Measuring Equipment), voient leurs performances se dégrader avec la distance.
- Les centrales à inertie présentent des performances qui se dégradent le long du vol, ce qui nécessite un recalage régulier.

La navigation par satellite apporte de nouvelles possibilités, notamment les suivantes :

- diminution des distances minimales entre avions, tout en améliorant la sécurité ;
- nouvelles trajectoires en phase d'approche et d'atterrissage, permettant de décongestionner les environs immédiats des aéroports ;
- généralisation des possibilités d'approche et d'atterrissage automatiques à tous les aéroports, permettant de ne plus réserver ces capacités aux aéroports équipés en moyens spécifiques et coûteux ;
- association avec les systèmes de communication aéronautiques, permettant de connaître avec précision les positions des avions et de mieux réguler le trafic au niveau des centres de contrôle aérien.

Simplification des moyens de navigation aérienne

Les systèmes GPS et Galileo offrent une performance globale sur l'ensemble du globe, ouvrant la voie à une simplification et à une harmonisation de l'ensemble des systèmes de navigation aériens.

Les infrastructures au sol, telles que VOR ou DME, coûteuses en maintenance et en équipements à bord des avions, pourront être remplacées par des constellations GPS et Galileo.

Sécurisation de l'aviation de loisir

Il y a aujourd'hui en Europe près de 30 000 avions privés, pour quelque 5 000 avions de ligne. Le GPS et Galileo permettent à l'ensemble de l'aviation non commerciale, incluant avions de tourisme, ULM, aérostats, etc., d'accéder à un positionnement précis capable de sécuriser leurs vols au moyen d'équipements embarqués peu onéreux.

Développement de nouvelles possibilités de transport aérien

Les systèmes GPS et Galileo permettent de développer de nouvelles applications, en particulier lorsqu'ils sont associés à des systèmes de communication, comme à de nouvelles capacités de vol. Les hélicoptères utilisés pour le sauvetage pourront, par exemple, intervenir dans des conditions difficiles, notamment de visibilité, ce qui était jusqu'alors impossible.

Le transport maritime

La navigation par GPS est couramment utilisée aujourd'hui par les navigateurs. Du fait de l'amélioration des performances de ces systèmes, en terme de précision comme d'intégrité, le GPS et Galileo pourront être utilisés dans toutes les phases de la navigation maritime, océanique comme côtière, en approche portuaire ou en manœuvres d'accostage, et dans toutes les conditions météorologiques.

L'OMI (Organisation maritime internationale) organise déjà la régulation de la navigation maritime en pleine mer par le biais du GPS. Les systèmes d'identification automatique et de gestion du trafic s'appuient sur le GPS et bientôt sur Galileo pour améliorer la sécurité et la prévention des collisions, en particulier dans les zones à trafic maritime intense.

Les manœuvres des bateaux par temps difficile, en zone portuaire ou fluviale, présentent des risques, comme les passages d'estuaire ou ceux à faible tirant d'eau. La navigation par satellite, complétée par des installations d'augmentation locales, offrant une précision de positionnement horizontale inférieure au mètre, permettent de développer des opérations automatisées et sécurisées sur ces phases de navigation difficiles, conduisant parfois à des arrêts de trafic ou à des accidents.

La cartographie maritime, qui recense les positions précises des obstacles à la navigation, tels les récifs ou les gisements, tire un grand bénéfice de la navigation par satellite. Il est possible de mettre en place des bases de données globales, offrant un moyen standardisé de cartographie précise pour l'ensemble des navigateurs. Un exemple d'application concerne les navires brise-glace, qui peuvent déterminer le trajet à suivre grâce à la connaissance de leur position et de celle des glaces de plus faible épaisseur.

Galileo offrira, en cas de naufrage, un service d'assistance, appelé SaR (Search and Rescue), bien plus performant que les systèmes actuels. Il fournira une précision de quelques mètres, contre quelques kilomètres avec les systèmes actuels, et un temps d'alerte quasiment immédiat, contre plusieurs heures. Le centre de traitement des appels pourra en outre transmettre en quelques minutes au récepteur Galileo de l'usager en détresse un « accusé de réception » afin d'augmenter les chances de survie des naufragés et de réduire le nombre de fausses alertes qui pénalisent les systèmes actuels.

Plus largement, c'est l'ensemble de la gestion des opérations maritimes qui bénéficie de l'utilisation de la navigation par satellite, que ce soit pour la localisation des filets de

pèche, la gestion des flottes, la planification des opérations ou la localisation des containers et le pilotage automatique de barges.

Il est également envisagé de développer des systèmes d'assistance aux personnels navigants, dont le contenu et l'interface avec l'opérateur s'adaptent à la position du navire (les besoins de l'aide au pilotage sont différents en haute mer ou en approche portuaire).

Le transport ferroviaire

Le transport ferroviaire en Europe représente environ 30 000 unités motrices (140 000 dans le monde). La navigation par satellite apporte un support pour moderniser et optimiser ce mode de transport.

La fonction de contrôle du déplacement des trains est devenue essentielle dans la perspective d'amélioration et de densification du trafic, tout en respectant les règles de sécurité très strictes propres à ce mode de transport.

L'introduction de la navigation par satellite dans les systèmes européens de contrôle des trains permettra, par exemple, en association avec des systèmes de communication, de fournir aux conducteurs et aux centres de contrôle des informations adéquates en fonction de la position des trains, évitant de la sorte le déploiement de signalisations sur un ensemble très étendu de lignes ferroviaires.

Le suivi de la position des trains offre en outre de nombreux avantages, notamment les suivants :

- Amélioration du service aux utilisateurs, que cela concerne le suivi des marchandises, l'information des retards aux usagers ou l'information aux usagers pendant le transport.
- Réduction de la consommation énergétique des trains en optimisant leurs accélérations et freinages en fonction des changements de conditions de circulation le long du trajet.

Enfin, les activités de surveillance des voies ferrées (165 000 km en Europe, près de 1 million dans le monde) nécessitent un positionnement très précis des informations recueillies. GPS et Galileo apportent là aussi une grande simplification.

Le transport automobile

Le GPS est maintenant entré dans la vie quotidienne des automobilistes. Associé aux satellites GPS, Galileo apportera une amélioration importante quant à la précision et à la disponibilité du positionnement dans les zones très urbanisées, où les masquages des immeubles réduisent les performances actuelles du GPS. On estime à 670 millions le nombre de voitures qui circuleront dans le monde en 2010.

Le particulier peut obtenir, à partir de son récepteur GPS, sa position à quelques mètres près, ainsi que des propositions d'itinéraires élaborés en temps réel vers la destination de son choix. Associé à des systèmes de communication, l'état du trafic routier peut également être pris en compte dans la recherche du meilleur itinéraire.

En cas de panne, une simple communication peut indiquer automatiquement la position au réparateur. En cas d'accident, ce sont les véhicules de secours qui sont informés précisément du lieu de l'accident. Dans ces cas d'urgence, une position à quelques mètres près peut s'avérer cruciale quand il s'agit, par exemple, de déterminer sur quelle voie d'une autoroute se trouve la personne en détresse.

Les professionnels utilisent le GPS depuis plusieurs années afin de gérer leur flotte de véhicules circulant à l'échelle d'une ville, voire d'un continent. Une étude menée par l'Institut français de navigation a évalué les gains de productivité apportés par les applications de gestion de flotte à au moins 10 % pour les transports routiers, 20 % pour les taxis et 5 % pour les autobus.

Le service aux usagers bénéficie directement de l'utilisation du GPS ou de Galileo dans les domaines suivants :

- Taxis des grandes agglomérations, qui peuvent indiquer en temps réel à leurs clients le temps d'attente pour obtenir un véhicule.
- Lignes de bus, qui proposent aux usagers des arrêts munis de panneaux digitaux leur indiquant l'heure d'arrivée du prochain bus.
- Compagnies de transport routier, qui peuvent informer leurs clients de la position de leurs camions de marchandises.

GPS et Galileo contribueront au développement des systèmes d'assistance au conducteur, permettant de lui fournir des informations en fonction de sa position ou de développer des systèmes anticollision.

Mentionnons enfin les initiatives destinées à développer des systèmes de paiement automatiques utilisant l'enregistrement des positions du véhicule lorsque celui-ci emprunte des portions payantes du réseau routier.

Agriculture et pêche

Les activités de production agricole et de pêche sont soumises à des contraintes de plus en plus fortes, que ce soit en terme de qualité, de respect de l'environnement, de rentabilité économique ou de régulation internationale.

L'utilisation de la navigation par satellite, déjà en cours depuis quelques années, apporte une meilleure maîtrise de toutes ces contraintes.

L'agriculture

Certains agriculteurs de grandes exploitations utilisent les services d'un système de positionnement en complément des images satellitaires. Cela leur permet, par exemple, de réduire l'utilisation de produits chimiques (engrais et insecticides), de déterminer au mètre près les zones d'un champ qui n'ont pas été correctement ensemencées, et ainsi de mieux les exploiter, de suivre avec précision la croissance des cultures ou encore de déterminer sans erreur et plus efficacement l'étendue des zones cultivées.

Utilisation des engrais et pesticides

L'utilisation massive d'engrais et pesticides, qui présentent des dangers pour l'environnement, est une réalité de l'agriculture. Pulvériser ces produits chimiques là où ce n'est pas nécessaire est doublement dommageable, car elle affecte l'environnement, d'une part, et la rentabilité économique, d'autre part.

Un avion pulvérisant ces produits sur de larges surfaces est soumis à de nombreuses imprécisions dans la répartition et le volume des produits répandus. En positionnant l'avion à chaque instant au mètre près, grâce à la navigation par satellite, il est possible de contrôler et visualiser précisément les zones déjà couvertes et celles à traiter.

Il est possible de relier le récepteur embarqué sur l'avion à une base de données contenant l'état et l'historique des cultures pour chaque lieu de la zone cultivée. Une telle base de données peut être construite à partir de mesures, d'échantillonnages et d'images satellitaires associés à une position précise. Un véritable contrôle automatique du volume de produit pulvérisé peut ainsi être mis en place en fonction de la position de l'avion (le volume est déterminé à partir de l'état des cultures enregistré dans la base de données).

Contrôle de la croissance des cultures

La surveillance de l'état des cultures, de la semence à la récolte, est un atout pour la gestion de la production agricole. Les exploitants agricoles ont besoin de déterminer et de localiser précisément un ensemble de données concernant leur culture, comme le niveau de croissance où l'apparition de maladies. Ces données peuvent être visualisées sous forme de cartes des zones cultivées, de façon que l'exploitant puisse décider du niveau des traitements chimiques, de l'arrosage ou encore des endroits où effectuer des prélèvements.

Contrôle des surfaces cultivées

Savoir quelles terres agricoles sont cultivées, quelle est leur localisation et quelle est l'étendue exacte des surfaces cultivées est indispensable pour administrer la production agricole. Les cartes cadastrales de propriété foncière ne correspondent pas toujours aux contours des zones de culture, lesquelles changent à chaque saison. L'utilisation de la navigation par satellite permet de mesurer les surfaces cultivées de façon plus précise et plus efficace.

La pêche

Grâce à la navigation par satellite, les pêcheurs peuvent localiser leurs bateaux avec une grande précision en tout point des mers et des océans. Un tel outil de navigation est devenu essentiel pour assurer leur sécurité face aux dangers de la mer (intempéries ou collisions), en remplacement des systèmes traditionnels de navigation en mer.

De plus, en repérant et en enregistrant les différents lieux de pêche, le GPS et Galileo contribuent à augmenter la productivité de leur exploitation.

Le respect des régulations nationales et internationales limitant les zones et les volumes de pêche s'impose en outre à tous les navires de pêche, sur l'ensemble du globe. Les systèmes globaux comme le GPS et Galileo répondent bien au besoin de localisation en mer pour des navires parcourant de vastes zones maritimes.

Géodésie et sciences

Du fait de sa couverture mondiale, la navigation par satellite offre un moyen global de localisation adapté à la surveillance de la planète et de son environnement.

Le suivi des mouvements des éléments à la surface terrestre est un élément essentiel pour alimenter les analyses de l'évolution du climat et de l'environnement terrestre. L'océanographie, qui étudie les océans et les courants marins, peut bénéficier de la localisation précise et permanente de balises flottantes équipées de récepteurs GPS.

L'étude des zones polaires et des mouvements de glaces établis grâce au GPS contribue à la connaissance de l'évolution du climat. Les mouvements tectoniques et volcaniques peuvent être mesurés au centimètre près grâce au GPS et aux techniques de mesure de géodésie. L'étude de l'atmosphère bénéficie également des mesures de propagation des signaux des satellites GPS à travers les différentes couches de l'atmosphère, tout comme la localisation précise des ballons sondes effectuant des mesures dans l'atmosphère.

Dans les sciences appliquées, la prospection pétrolière utilise le positionnement GPS pour repérer chaque lieu de recherche et chaque endroit de forage, en particulier lorsqu'il s'agit d'enregistrer le lieu choisi pour un forage offshore.

Dans un tout autre domaine, notre connaissance des animaux sauvages et la protection des espèces menacées peuvent être aidées par des récepteurs miniaturisés, fixés sur les animaux concernés et permettant de connaître leurs déplacements dans leur environnement naturel.

Applications gouvernementales

La plus importante des applications dites gouvernementales concerne l'utilisation du GPS et bientôt de Galileo par les forces armées, en situation de guerre ou de crise.

Les services GPS PPS et Galileo PRS, dont les accès sont protégés par des techniques de cryptage du signal, sont dédiés à ces applications.

La navigation par satellite apporte principalement un effet dit « multiplicateur de forces ». Grâce au positionnement précis des équipements, des troupes et des armes, il est possible d'optimiser les ressources engagées. Le fait d'utiliser des armes, comme les missiles, d'une grande précision permet de réduire le nombre de munitions utilisées et, par voie de conséquence, celui des troupes et des équipements déployés, de même que la logistique associée.

Il est intéressant de noter que l'accès à des modèles d'information terrestres (GIS) précis est un enjeu primordial pour exploiter les capacités du système de navigation. La connaissance de la position d'un récepteur n'a d'intérêt que si cette position peut être rapprochée de positions précises des cibles ou des lieux d'intérêt. Le développement des systèmes d'observation par satellite ou par avion ou drone de reconnaissance, eux-mêmes équipés de récepteurs GPS, est une autre composante essentielle de la navigation par satellite sur les théâtres d'opérations militaires.

D'autres applications gouvernementales sont apparues avec le développement du GPS, par exemple dans le domaine de la justice. Grâce à la miniaturisation croissante des récepteurs, une nouvelle forme de surveillance de détenus en liberté conditionnelle se développe, permettant de suivre les déplacements d'un délinquant porteur d'un bracelet électronique équipé d'un récepteur GPS et d'un dispositif de communication.

Autres exemples d'applications

Parmi les autres applications s'appuyant sur les services de navigation par satellite, citons les suivantes :

- Les transactions financières, qui nécessitent une sécurisation totale des milliards de données électroniques échangées chaque jour. La sécurisation des échanges de données et les nouvelles technologies de cryptage reposent en grande partie sur la parfaite synchronisation des calculateurs et sur la grande précision de la datation des données produites. La navigation par satellite offre cette capacité à l'échelle mondiale en garantissant une excellente synchronisation des moyens d'échange des données.
- Les travaux publics et d'équipement obtiennent une aide significative de l'utilisation du GPS. Cela concerne l'automatisation et le guidage de certains engins de chantier, par exemple pour le terrassement ou l'exploitation de carrières, comme la surveillance de la déformation des grandes structures, les ponts soumis à de fortes charges ou encore le positionnement des engins sur de vastes chantiers.

- La protection civile en cas de désastre naturel. Du fait de leur nature globale et spatiale, le GPS et Galileo sont toujours disponibles sur les zones sinistrées suite à une catastrophe naturelle (tremblement de terre). En permettant de repérer rapidement des lieux, personnes ou équipements, ils offrent une aide appréciable pour accélérer et sécuriser le secours aux victimes et le rétablissement rapide des infrastructures. Concernant la prévention des risques naturels, le GPS permet déjà de prévenir les glissements de terrain ou de détecter les risques d'éruptions volcaniques.
- La gestion des grandes installations de transport d'énergie électrique exige de pouvoir dater certains événements avec une précision supérieure au millième de seconde, par exemple afin de diagnostiquer l'origine de dysfonctionnements ou de pannes, dont les effets se propagent très rapidement. Le positionnement précis des installations des centres de production énergétique jusqu'au particulier permet également d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance ou de réparation.

Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la grande diversité des applications GPS ou Galileo développées ou en devenir.

Il est encore trop tôt pour évaluer l'ampleur que prendront ces applications dans notre vie quotidienne, mais force est de constater que, suite au succès du GPS, le développement de nouveaux systèmes globaux de navigation comme Galileo et la miniaturisation constante des récepteurs permettront de développer de nouvelles applications.

4

Le système GPS

Sous l’impulsion du département de la Défense américain et de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), le développement d’un système global de positionnement par satellites a débuté au cours des années 1960. Mais il a fallu attendre 1994, et l’achèvement de la mise en place du système GPS (Global Positioning System) dans sa configuration complète, c’est-à-dire avec vingt-quatre satellites, pour que de véritables applications de navigation par satellite voient le jour.

Le principal précurseur du GPS fut le système TRANSIT, opéré par la marine américaine, qui fut rendu disponible pour des usages civils dès 1967. Ce système s’appuyait sur des satellites en orbite basse, à 1 100 km d’altitude, ce qui limitait fortement leur durée de visibilité par un récepteur utilisateur (les visibilités les plus longues duraient environ vingt minutes). Le positionnement n’était pas disponible en permanence, le temps d’attente avant d’obtenir un positionnement pouvant atteindre plusieurs heures. Cependant, ce système fut largement utilisé par la marine américaine, ainsi que pour des usages géodésiques.

Le besoin d’un service de positionnement précis, global et permanent a conduit le ministère de la Défense américain à mettre en place un nouveau système de satellites à des altitudes plus élevées, le GPS, utilisant les satellites Navstar (Navigation Satellite Timing and Ranging).

Le premier satellite Navstar fut lancé le 22 février 1978. Il faisait partie des satellites du groupe dit Block I, qui ont permis de valider le fonctionnement du système en fournissant un premier niveau de services sur certaines zones géographiques ciblées. Les satellites du Block I ne permettant pas de contrôler le niveau de performances offert aux usagers civils, ce sont les satellites du Block II qui, à partir de février 1989, ont introduit le

dispositif de SA (Selective Availability), qui permet aux opérateurs du système GPS de régler le niveau de performances offert aux usagers. Le 25 mars 1990, le dispositif de SA fut activé, dégradant la précision du positionnement pour les usagers civils à plus de 100 m en horizontal. Ce dispositif est resté actif pendant dix ans, jusqu'au 2 mai 2000, avant d'être mis en sommeil par une directive du président américain Bill Clinton.

Le déploiement complet du système a été atteint en 1994, avec la mise en place des derniers satellites composant la constellation de vingt-quatre satellites Block II et Block IIA, une version améliorée du Block II.

Les satellites ayant une durée de vie limitée, généralement d'une dizaine d'années, la constellation GPS est en constant renouvellement. Après les satellites du Block IIA, les satellites du Block IIR ont été régulièrement mis en orbite afin de remplacer les satellites vieillissant ou défectueux. Le premier satellite du Block IIR a été mis en orbite en 1997. Il a été suivi d'une version modernisée, dite Block IIR-M, en décembre 2005. Le block suivant, le Block IIF, doit être mis en place à partir de 2007.

Services et signaux GPS

Le GPS offre depuis 1994 deux services, le service SPS (Standard Positioning Service), qui utilise le code C/A sur la fréquence L1, et le service PPS (Precise Positioning Service), qui utilise le code P(Y) sur les fréquences L1 et L2.

Un programme de modernisation du GPS permettra d'étendre ses possibilités à de nouveaux services par la mise en place de signaux supplémentaires.

Le service SPS

Le service SPS est librement accessible, en tout point du globe, à tout usager muni d'un récepteur monofréquence L1, fréquence centrée sur la valeur 1 575,42 MHz. C'est le service utilisé couramment dans toutes les applications civiles fondées sur le GPS.

Les opérateurs du système GPS ont la possibilité de contrôler les performances de ce service, par l'intermédiaire du dispositif SA (Selective Availability). L'activation de la SA, effective entre 1990 et 2000, induit une diminution des performances du service SPS résultant d'une dégradation des données de navigation transmises par les satellites, notamment les suivantes :

- éphémérides erronées *(epsilon) ;*
- introduction d'un bruit d'horloge *(clock dither).*

Seuls les utilisateurs autorisés, ayant accès à un module cryptologique et aux codes associés, peuvent éliminer ces erreurs intentionnelles.

Lorsque la SA est activée, la précision de positionnement horizontale est de 100 m. En l'absence de SA, le positionnement horizontal atteint une précision à moins de 10 m près.

La SA a été désactivée le 1er Mai 2000 à minuit. Les effets sur les performances du service GPS/SPS ont été immédiats, comme l'illustre la figure 4.1.

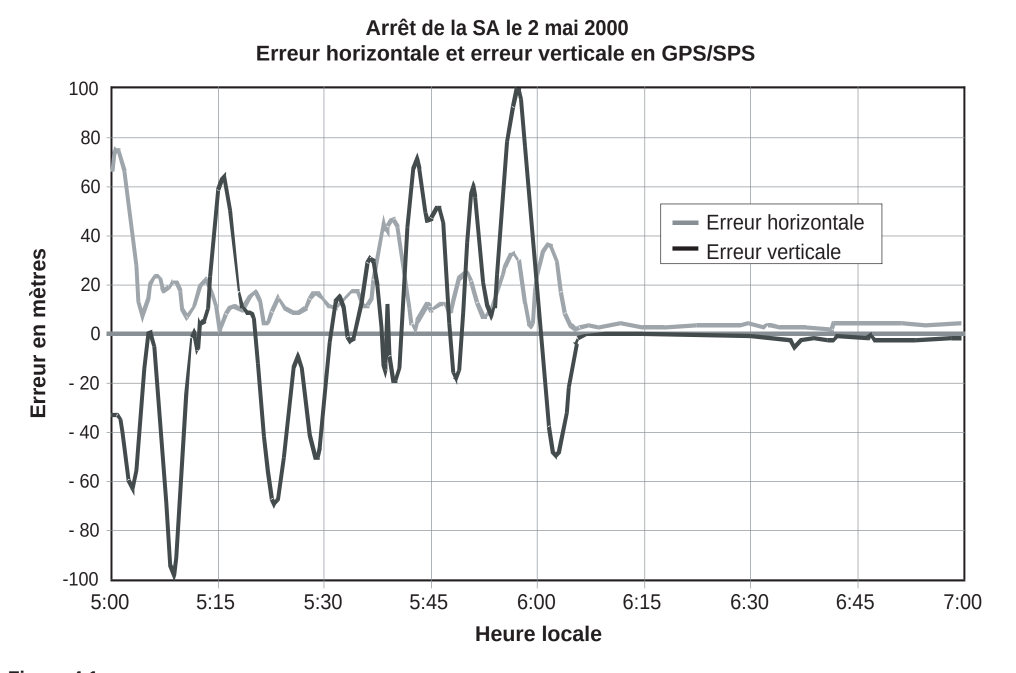


Figure 4.1

Performance du service SPS et effets de l'arrêt de la SA

Le service PPS

Le service PPS repose sur l'utilisation de deux fréquences, L1 (1 575,42 MHz) et L2 (1 227,60 MHz), ainsi que sur le code P(Y), qui est modulé sur ces deux fréquences.

Ce service est principalement destiné aux forces armées et agences gouvernementales américaines, mais il est également rendu disponible à d'autres gouvernements, comme les alliés de l'OTAN, à la discrétion du gouvernement américain. En tout état de cause, son accès est contrôlé. Le code P peut en outre être transformé en code Y (crypté) afin d'offrir une protection contre d'éventuelles tentatives de corruption mal intentionnées des signaux GPS.

Le code P offre de meilleures performances que le code C/A en terme de précision de mesure et de résistance aux brouillages et aux interférences. De plus, le code P étant

diffusé sur les fréquences L1 et L2, les récepteurs PPS peuvent effectuer une correction des erreurs ionosphériques grâce aux mesures bifréquence. La précision du service PPS est donc meilleure que celle du service SPS. Elle reste cependant réservée à des usagers autorisés.

Nouveaux services du GPS modernisé

Le succès des applications militaires et civiles du GPS, ajouté aux besoins croissants d'une communauté d'utilisateurs en constante progression, a conduit le gouvernement américain a mettre en place un programme de modernisation du système GPS permettant la fourniture de signaux et services supplémentaires tout en assurant le maintien des services SPS et PPS existants.

Le code M pour les applications militaires

Le code P(Y) du service PPS introduit certaines limitations par rapport aux besoins des utilisateurs militaires du GPS, en particulier concernant la résistance aux brouillages et leurrages intentionnels, la vitesse d'acquisition du code et du service (temps de premier fix) et la capacité à discriminer les différents utilisateurs.

Le système GPS s'est donc doté progressivement, au fur et à mesure du lancement des nouveaux satellites en remplacement des anciens, d'un nouveau code, dit code M, sur les signaux L1 et L2, réservé aux usagers militaires habilités.

Les signaux L2 et L5 pour les applications civiles

Les applications civiles du GPS reposent sur la seule exploitation du code C/A modulé sur la fréquence L1. Cela conduit à des limitations des performances et de la robustesse du service. Le département des transports américain a décidé de mettre en place les évolutions suivantes dans les signaux GPS en accès libre et à usage civil :

- Introduction d'un nouveau signal (code + données de navigation) sur la fréquence L2. Ce nouveau signal est constitué de deux nouveaux codes, offrant de meilleures performances que le code C/A, ainsi que des données de navigations CNAV optimisées par rapport aux données transmises sur la fréquence L1. Le premier satellite transmettant ce nouveau signal L2 civil (Block IIR-M) est opérationnel depuis le 16 décembre 2005.

- Introduction d'un nouveau signal (code + données de navigation) sur une nouvelle fréquence L5, centrée sur 1 176 MHz, transmettant également des données de navigation CNAV optimisées.

Ces nouveaux signaux à usage civil seront progressivement mis en place avec le renouvellement programmé des satellites GPS, conduisant à une disponibilité complète des nouveaux services associés à l'horizon 2012-2015.

La figure 4.2 illustre les évolutions prévues des signaux GPS dans le plan de fréquences.

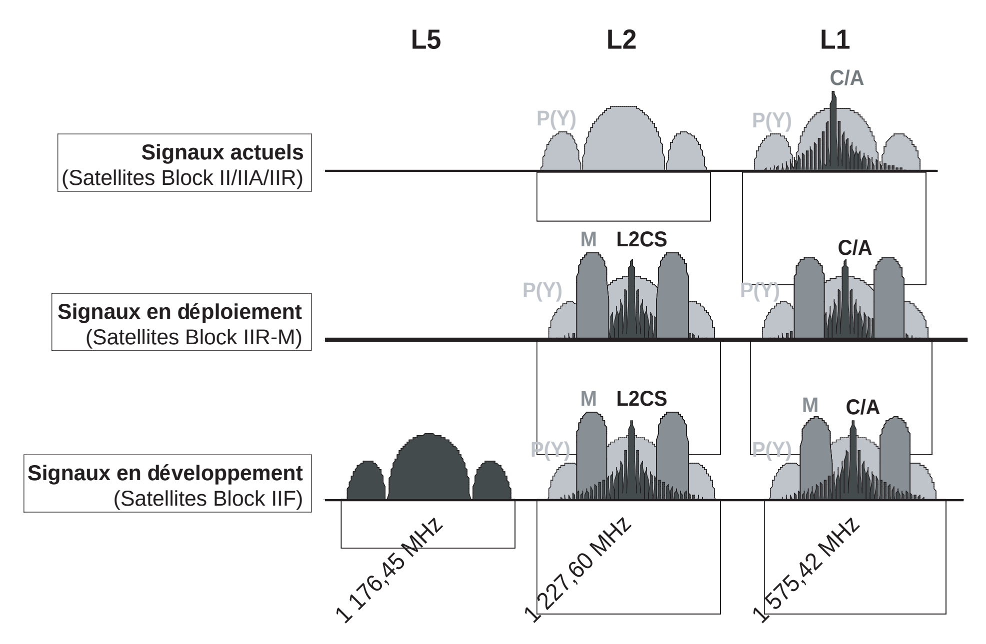


Figure 4.2

Évolution des signaux GPS dans le plan de fréquences

Infrastructure du système GPS

Vu de l'utilisateur, le système GPS prend la forme d'un récepteur, autonome ou intégré, fournissant une information de positionnement et de datation. Derrière chacun de ces récepteurs se cache une imposante infrastructure déployée dans l'espace et au sol.

Les sections qui suivent donnent un aperçu de ces deux composantes essentielles, le segment spatial, c'est-à-dire la constellation de satellites, et le segment sol du système GPS.

La constellation de satellites Navstar-GPS

La constellation du système GPS est constituée des satellites Navstar. Elle comprend au minimum vingt-quatre satellites, positionnés à une altitude de 20 200 km et évoluant sur des orbites circulaires inclinées à 55° par rapport à l'équateur.

Les satellites Navstar-GPS sont répartis dans six plans orbitaux différents, comprenant chacun quatre satellites.

La figure 4.3 illustre la géométrie de la constellation GPS à partir des positions réelles des satellites GPS, telles que diffusées par les almanachs GPS le 9 mai 2006. Nous pouvons observer les différents plans d'orbite de chaque satellite et la légère dispersion des orbites réelles par rapport à leur plan de référence. Cette dispersion est due aux différentes forces perturbatrices, telles que l'attraction du Soleil et de la Lune ou la pression des flux de particules solaires, qui, accumulées sur de longues périodes, modifient la trajectoire des satellites, et donc leur orbite, par rapport à leur trajectoire idéale, située dans leur plan de référence.

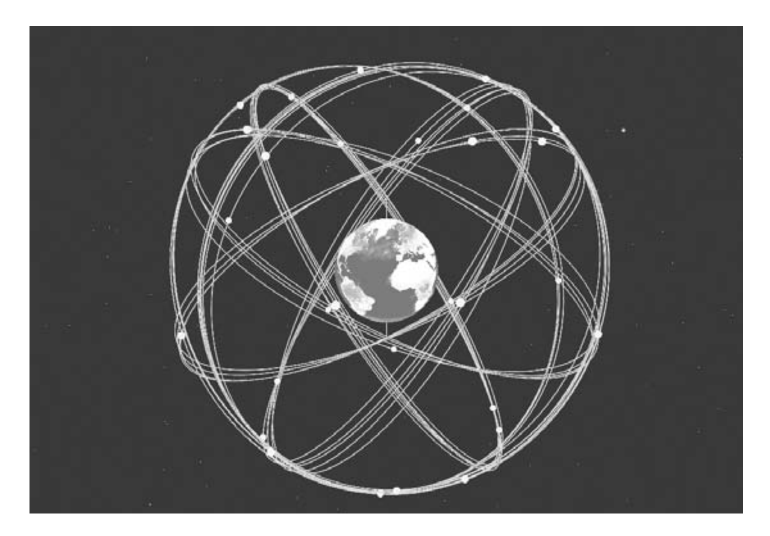


Figure 4.3

La constellation GPS le 9 mai 2006 (vue réalisée avec SatOrb, Sup'Aéro)

Le positionnement des satellites à l'intérieur de chaque plan et d'un plan à un autre est contrôlé et adapté régulièrement en fonction des performances recherchées et du vieillissement spécifique de chaque satellite.

La figure 4.4 illustre la répartition des satellites dans leur plan à la date du 9 mai 2006. La position relative des satellites entre eux, à l'intérieur d'un même plan et d'un plan à l'autre, reste fixe. Par contre, la position figurée de chaque satellite par rapport à l'équateur correspond à un instant donné dans la journée. Nous pouvons remarquer que le nombre de satellites effectivement en place est supérieur au nombre nominal de vingt-quatre. Cela est dû, en particulier, au besoin d'assurer les performances recherchées, même en cas de défaillance d'un ou de plusieurs satellites.

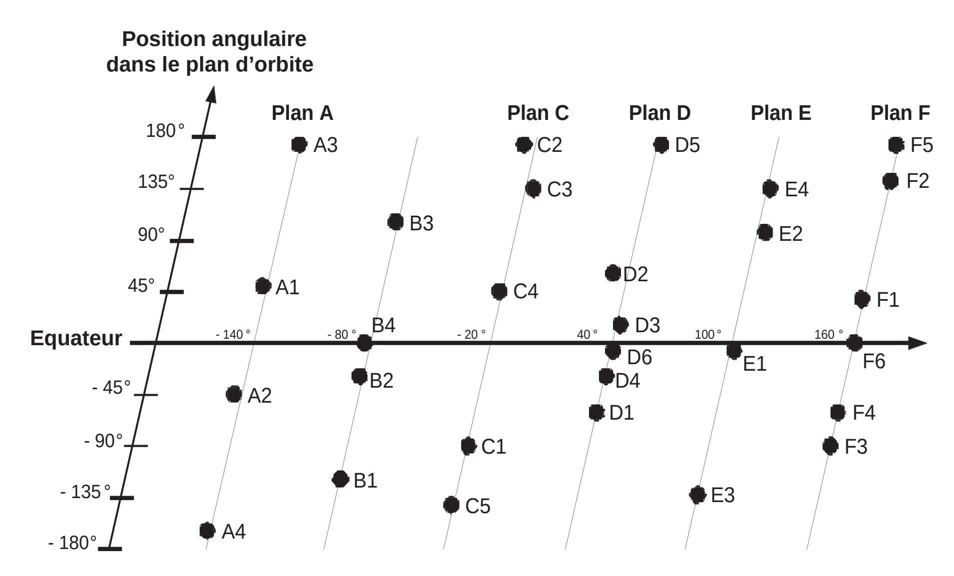


Figure 4.4

Répartition des satellites GPS dans leur plan au 9 mai 2006

Placés sur des orbites circulaires de 26 560 km de rayon, c'est-à-dire à environ 20 200 km d'altitude, les satellites Navstar-GPS effectuent une révolution complète autour du globe en un peu moins de douze heures. Ce mouvement du satellite autour de la Terre se combine avec le mouvement de rotation de la Terre autour d'elle-même. La trajectoire de chaque satellite telle qu'observée par un usager à la surface terrestre est la résultante de ces deux rotations.

Il est possible de tracer la trajectoire du satellite sur une carte terrestre, ce que l'on appelle une trace au sol. Cela correspond à l'ensemble des lieux survolés à la verticale par un satellite.

La Terre fait un tour sur elle-même en un jour sidéral *(voir encadré)*, soit 23 heures et 56 minutes. L'altitude des satellites Navstar-GPS est définie de telle sorte que chaque satellite effectue exactement deux révolutions sur son orbite pendant un jour sidéral. Les satellites effectuent donc une révolution orbitale en 11 h 58 minutes. Ainsi, chaque satellite survole les mêmes lieux toutes les 23 heures et 56 minutes. Cela revient à dire que leur trace au sol se répète au bout de deux orbites, comme l'illustre la figure 4.5.

Pour un utilisateur restant à un endroit fixe et dont la référence de temps est le jour solaire de vingt-quatre heures, chaque satellite GPS effectue tous les jours la même trajectoire au-dessus de l'horizon, mais il apparaît chaque jour quatre minutes en avance par rapport à la veille.

On peut également tracer sur une carte l'ensemble des lieux visibles par un satellite à un instant donné : il s'agit de la zone de visibilité instantanée du satellite considéré.

La figure 4.5 illustre la position de l'ensemble des satellites de la constellation GPS le 9 mai 2006, ainsi que la trace au sol correspondant à vingt-quatre heures de rotation du satellite Block IIR-M PRN-17 (le premier satellite de ce nouveau Block) et la zone de visibilité au sol de ce même satellite à l'instant considéré.

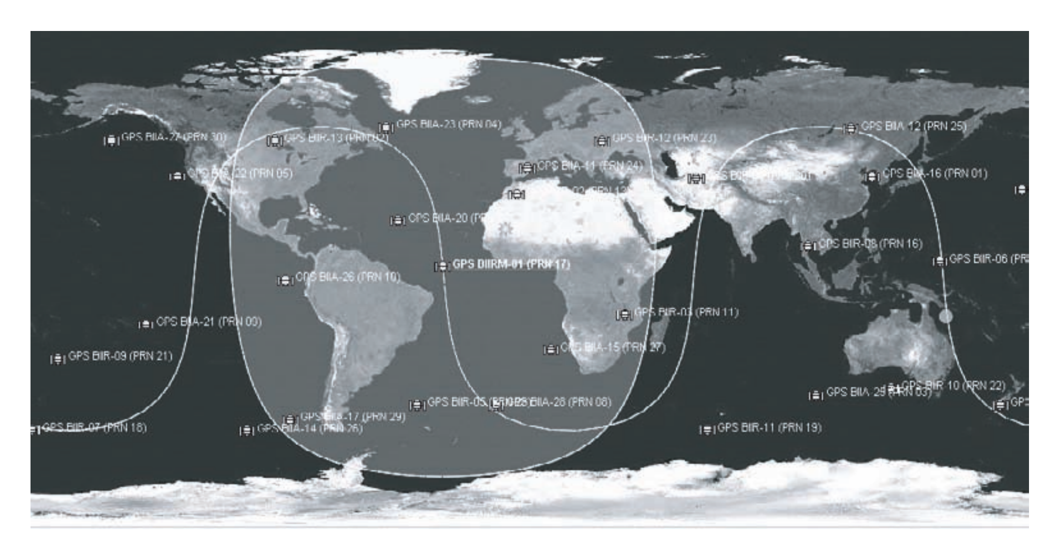


Figure 4.5

Traces au sol et zone de visibilité des satellites GPS (source SatOrb, Sup'Aéro)

Jour sidéral et jour solaire

Nos journées durent vingt-quatre heures. Cette durée correspond au cycle jour/nuit créé par le mouvement apparent du Soleil autour de la Terre. Le jour solaire correspond donc au temps que met la Terre pour faire une rotation complète et se retrouver dans la même orientation par rapport au Soleil. Cependant, il ne correspond pas exactement au temps que met la Terre à faire une rotation complète autour d'elle-même « dans l'absolu », c'est-à-dire par rapport aux étoiles.

Le mouvement apparent du Soleil dans notre ciel est la résultante de la combinaison de deux mouvements : la rotation de la Terre autour d'elle-même et la rotation de la Terre autour du Soleil. La Terre fait un tour complet autour du Soleil (360°) en un an (365 jours). Cela signifie qu'en un jour, le mouvement apparent du Soleil dans le ciel est d'environ 1°. En parallèle, la Terre fait un tour autour d'elle-même (360°) en vingt-trois heures et cinquante-six minutes, soit environ 1° en quatre minutes. L'écart entre le jour solaire et le jour sidéral correspond donc au fait que la Terre tourne tous les jours de 1° autour du Soleil et qu'il faut donc quatre minutes de rotation de la Terre autour d'elle-même en plus pour qu'elle se retrouve dans la même position par rapport au Soleil. Cet écart entre jour solaire et jour sidéral est illustré à la figure 4.6.

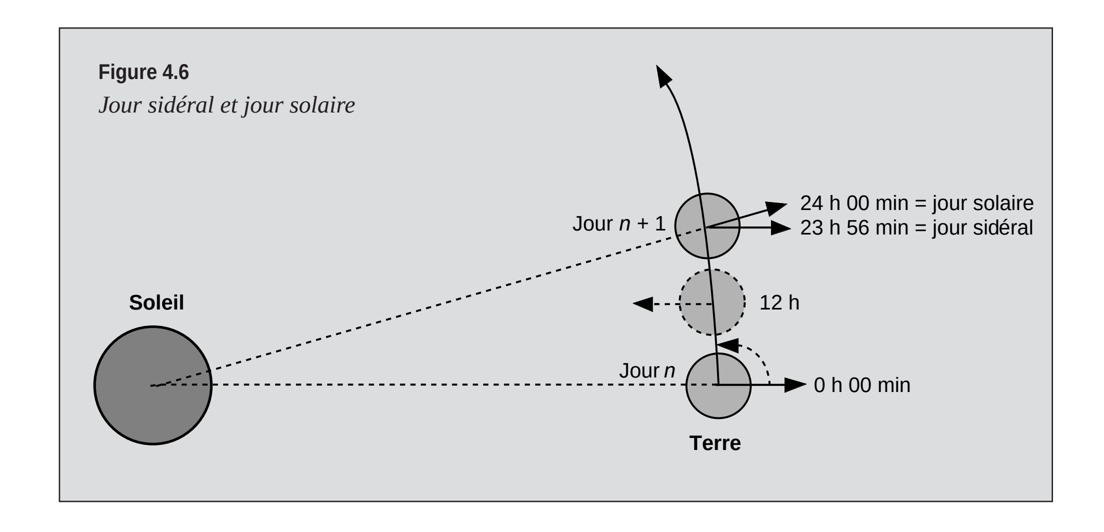


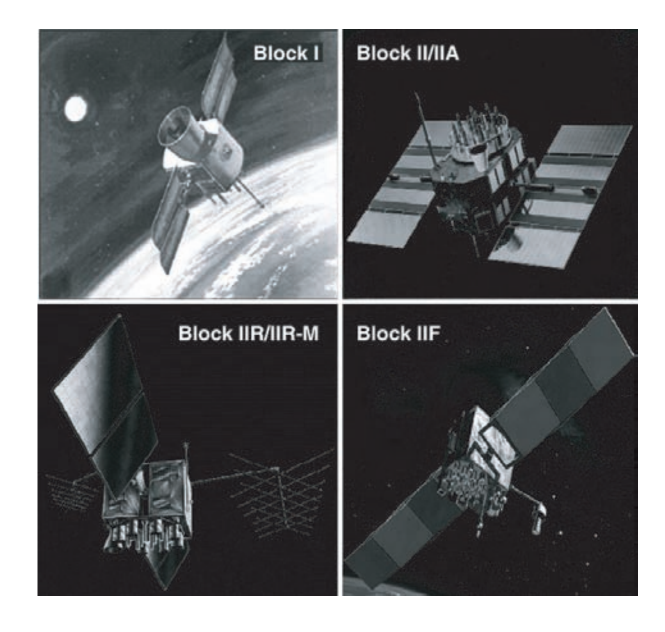
Figure 4.6
Jour sidéral et jour solaire

Les satellites Navstar-GPS

Le premier satellite Navstar-GPS a été lancé le 22 février 1978. Il faisait partie du Block I, c'est-à-dire de la première génération des satellites GPS. Depuis, plusieurs versions modernisées des satellites GPS ont été lancées ou sont en production, appartenant successivement aux Blocks II/IIA, IIR/IIR-M et IIF.

La figure 4.7 illustre, à travers des vues d'artiste, ces différents types de satellites.

Figure 4.7
Versions successives des satellites Navstar-GPS (source *www.navcen.uscg.goc/gps*)



Si tous les satellites d'un même Block sont identiques, leurs caractéristiques et performances ont évolué d'un Block à l'autre :

- Block I : il s'agit des onze premiers satellites GPS, lancés entre février 1978 et octobre 1985, qui ont permis de valider le fonctionnement du système. Ils ont été réalisés par Rockwell aux États-Unis.
- Blocks II et IIA : également construits par Rockwell, ils ont été lancés entre février 1989 et juin 1997. Les neuf satellites du Block II et les dix-neuf satellites du Block IIA ont permis d'atteindre la pleine capacité opérationnelle des services SPS et PPS dès 1994. Ces satellites pèsent environ 850 kg et déploient deux panneaux solaires d'une surface totale d'environ 15 m^2. Ils embarquent deux horloges atomiques au rubidium et deux au césium. Ils sont conçus pour une durée de vie de sept ans et demi.
- Blocks IIR et IIR-M : ces satellites ont été produits par Lockheed Martin au nombre de vingt et un. Le premier lancement réussi a eu lieu le 23 juillet 1997, après un premier échec au mois de janvier de la même année. Cette version des satellites Navstar est conçue pour offrir une autonomie accrue grâce à l'utilisation de transmissions entre les satellites, permettant un fonctionnement du système même en cas de perte de stations au sol. Les satellites IIR-M ont été modifiés de façon à introduire les nouveaux signaux L2-C (signal civil sur la fréquence L2) et code-M (nouveau code pour applications militaires sur les fréquences L1 et L2). Le premier satellite du Block IIR-M a été lancé le 25 septembre 2005 et déclaré opérationnel le 16 décembre 2005.
- Block IIF : cette nouvelle génération de satellites, réalisée par Boeing et déployée à partir de 2007, permet de mettre en place le nouveau signal à usage civil sur la fréquence L5. Le tableau 4.1 précise quels signaux sont transmis sur quelles versions des satellites GPS.
- Block III : dès l'année 2000, l'administration américaine (DOD et DOT) a amorcé des études pour le développement d'une nouvelle génération de satellites GPS, dite Block III, intégrant un quatrième signal à usage civil ainsi qu'un service d'intégrité, qui devrait voir le jour à partir de 2013.

Tableau 4.1 – Implémentation des nouveaux signaux sur les satellites GPS

Signal	Block IIR	Block IIR-M	Block IIF
L1 C/A	x	x	x
L1 P(Y)	x	x	x
L1 M		x	x
L2 Civil		x	x
L2 P(Y)	x	x	x
L2 M		x	x
L5 Civil			x

Déploiement et renouvellement de la constellation

La constellation GPS est une des plus importantes maintenue dans l'espace. Sa mise en place a été progressive et a nécessité de nombreux lancements mettant en orbite chaque satellite individuellement.

Le déploiement complet de la constellation a été atteint avec plus d'une vingtaine de lancements, espacés sur une dizaine d'années, entre 1984 et 1994. Depuis 1994, les satellites en fin de vie sont régulièrement remplacés, avec en moyenne trois à quatre lancements par an.

Le tableau 4.2 donne la liste des différents satellites constituant la constellation opérationnelle au 9 mai 2006, avec leur type et leur date de lancement. À cette date, la constellation GPS est constituée de vingt-neuf satellites, dont seize de type Block II/IIA, douze de type Block IIR et un de type Block IIR-M. Le PRN désigne le numéro associé au code utilisé par le satellite, qui permet au récepteur d'identifier chaque satellite.

Tableau 4.2 – État de la constellation GPS le 9 mai 2006

PRN	Block	Date de lancement	Position dans la constellation
15	II-9	1er octobre 1990	D5
24	IIA-11	4 juillet 1991	D6
25	IIA-12	23 février 1992	A2
26	IIA-14	7 juillet 1992	F2
27	IIA-15	9 septembre 1992	A4
01	IIA-16	22 novembre 1992	F6
29	IIA-17	18 décembre 1992	F5
07	IIA-20	13 mai 1993	C5
09	IIA-21	26 juin 1993	A1
05	IIA-22	30 août 1993	B4
04	IIA-23	26 octobre 1993	D4
06	IIA-24	10 mars 1994	C1
03	IIA-25	28 mars 1996	C2
10	IIA-26	16 juillet 1996	E3
30	IIA-27	12 septembre 1996	B2
08	IIA-28	6 novembre 1997	A3
13	IIR-2	23 juillet 1997	F3
11	IIR-3	7 octobre 1999	D2

Tableau 4.2 – État de la constellation GPS le 9 mai 2006 *(suite)*

PRN	Block	Date de lancement	Position dans la constellation
20	IIR-4	11 mai 2000	E1
28	IIR-5	16 juillet 2000	B3
14	IIR-6	10 novembre 2000	F1
18	IIR-7	30 janvier 2001	E4
16	IIR-8	29 janvier 2003	B1
21	IIR-9	31 mars 2003	D3
22	IIR-10	21 décembre 2003	E2
19	IIR-11	20 mars 2004	C3
23	IIR-12	23 juin 2004	F4
02	IIR-13	6 novembre 2004	D1
17	IIR-M1	26 septembre 2005	C4

La figure 4.8 indique l'âge des satellites constituant la constellation opérationnelle le 9 mai 2006. La moyenne d'âge des satellites opérationnels est de huit ans et demi.

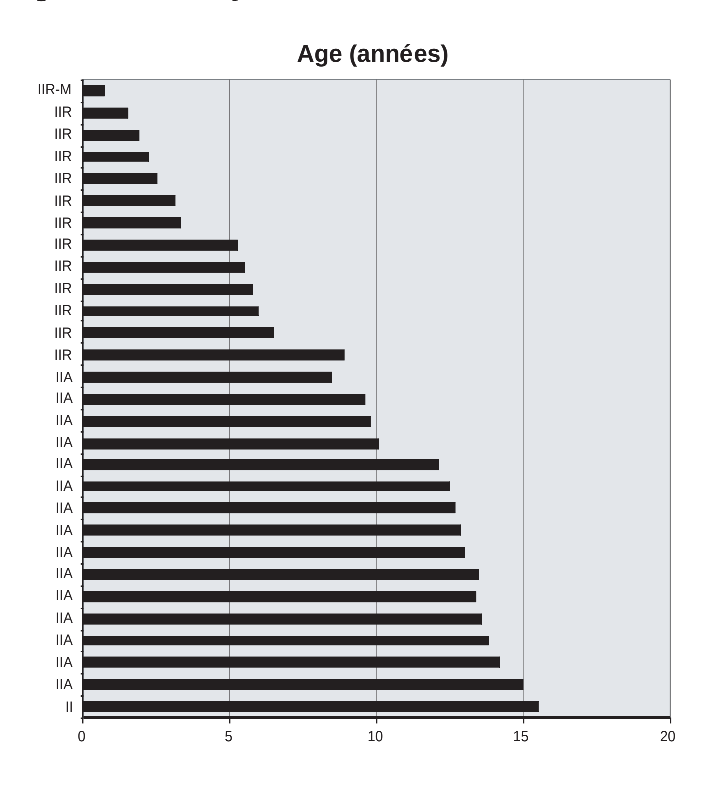


Figure 4.8
Âge des satellites Navstar-GPS le 9 mai 2006

Infrastructure au sol du système GPS

L'infrastructure au sol, ou segment sol, est la deuxième composante essentielle du système GPS. Ses fonctions principales sont de contrôler les satellites au cours de leur durée de vie, de calculer les données que les satellites doivent diffuser aux récepteurs utilisateur et d'opérer l'ensemble du système.

Comme l'illustre la figure 4.9, cette infrastructure comprend plusieurs éléments déployés sur le globe, notamment les suivants :

- La station de contrôle principale, ou MCS (Master Control Centre), située au sein d'une base de l'US Air Force dans le Colorado.
- Les stations de surveillance, ou MS (Monitor Station), qui effectuent des mesures sur les signaux diffusés par les satellites.
- Les antennes sol, ou Ground Antennas, qui permettent de communiquer avec le satellite pour lui transmettre des télécommandes et recevoir des messages de contrôle.

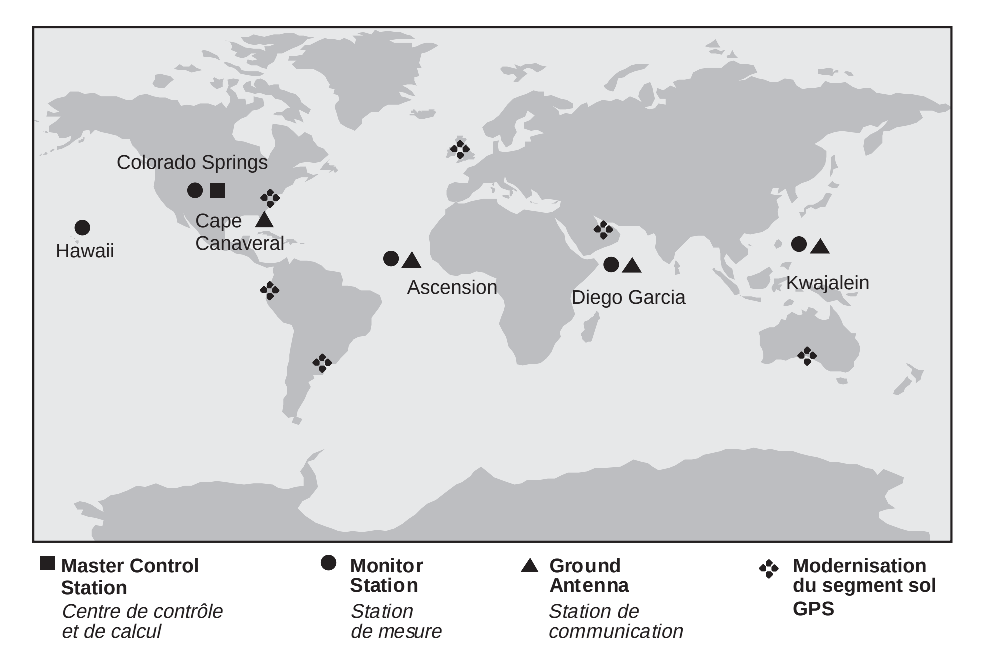


Figure 4.9

Infrastructure au sol du système GPS

Tout comme la constellation GPS, le segment sol évolue, en particulier par la mise en place de stations de mesures supplémentaires, afin d'améliorer les performances de précision de calcul des positions des satellites et du service de navigation GPS.

Du point de vue de l'utilisateur, la fonction principale du segment sol est de calculer les messages qu'il utilise pour déterminer sa position, autrement dit les almanachs, éphémérides précises et corrections d'horloge satellite. Nous avons vu au chapitre 1 à quel point il était important de déterminer ces paramètres avec une extrême précision. La position de chaque satellite doit être calculée en tout instant et prédite plusieurs heures à l'avance avec une précision de l'ordre du mètre. De leur côté, les horloges de chaque satellite doivent être synchronisées par rapport à l'horloge principale à quelques nanosecondes près.

Le segment sol GPS est constitué de plusieurs stations de surveillance, qui collectent en permanence des mesures de distance entre leur position (fixe et connue) et la position instantanée de chaque satellite en visibilité. Ces mesures sont ensuite transmises à un centre de calcul dans le MCS. Grâce à de puissants algorithmes de calcul et à des modèles très précis de mécanique spatiale, ce dernier restitue la trajectoire de chaque satellite et effectue une prédiction de sa trajectoire future. Cette trajectoire prédite est ensuite traduite sous forme de messages d'éphémérides, lesquels sont transmis aux satellites par l'intermédiaire des antennes sol pour être stockés à bord, puis transmis aux récepteurs utilisateur pendant la durée où ils sont valides.

Le segment sol GPS s'appuie sur l'USNO (US Naval Observatory) du département de la Défense américain pour établir son temps de référence système. Comme nous le verrons au chapitre 7, la référence de temps fournie par l'USNO est maintenue étroitement liée au temps international UTC (Universal Time Coordinates). On parle du temps UTC(USNO). Ainsi, c'est la référence de temps UTC(USNO) que les récepteurs GPS permettent de restituer très précisément lorsqu'ils peuvent établir une solution de navigation à partir des satellites GPS en vue.

Contrôle et opérations

Pour achever l'aperçu du système GPS, il est intéressant de compléter la description technique du système par une vue plus opérationnelle de son contrôle et de ses opérations.

Contrôle du programme GPS

Comme expliqué précédemment, le système GPS a été développé puis déployé sous l'impulsion et la direction du département de la Défense américain (DOD). Ainsi, jusqu'en 1996, ce sont le DOD et les états-majors des armées américaines, par l'intermédiaire du JPO (Joint Program Office), qui ont opéré le système GPS.

Cependant, par directives présidentielles, publiées en 1996 et en 2004, fixant les nouvelles orientations stratégiques du programme GPS, la mise en œuvre du système a évolué pour prendre en compte les besoins de l'ensemble de l'économie et des applications civiles. Ainsi, depuis 2004, les dispositions suivantes ont été établies :

- Une organisation interministérielle de gestion du GPS, appelée National Space-Based PNT (Positioning, Navigation, and Timing) Executive Committee, a été mise en place.

Coprésidé par le DOD et le DOT, ce comité décide des orientations du programme GPS et des programmes associés, comme les systèmes d'augmentation régionale *(voir le chapitre 6).*

- Le DOD garde la responsabilité des opérations et de la maintenance du système, tandis que le DOT contribue au financement et au contrôle de la fourniture des signaux à application civile.

Le GPS reste donc une infrastructure dont les opérations sont placées sous le contrôle direct de l'armée américaine, même si son importance stratégique dans l'ensemble de l'économie et de la sécurité civile est clairement reconnue et gérée au plus haut niveau politique des États-Unis.

Opérations du système GPS

La connaissance directe par le public des opérations du GPS est bien sûr réduite, compte tenu de la nature militaire de ces activités. Cependant, ces opérations sont souvent directement visibles au travers de leurs effets sur les différents services et signaux GPS.

Nous présentons ci-après les principales opérations observables du point de vue de l'utilisateur.

Opérations de maintien du service de navigation

Cela concerne la mise en œuvre des éléments du segment sol, qui calculent à échéance régulière les données de navigation et transmettent à chaque satellite les dernières données à jour.

Du point de vue de l'utilisateur, ces opérations assurent un renouvellement constant des messages de navigation de façon à en maintenir la précision. Cela implique de contacter quotidiennement chaque satellite afin de lui donner les dernières données calculées.

Renouvellement des satellites

Les satellites, conçus pour une durée de vie de sept ans et demi, restent en réalité opérationnels sur des périodes pouvant aller jusqu'à quinze ans. Cependant, il faut périodiquement remplacer les satellites en fin de vie par de nouveaux satellites. Pour cela, il est nécessaire de prévoir les lancements en fonction de l'état de vieillissement de chaque satellite de la constellation.

S'ensuivent toutes les opérations de mise à poste du satellite, c'est-à-dire son positionnement en conditions opérationnelles sur sa position finale, puis l'introduction du nouveau satellite au niveau du service fourni aux utilisateurs. Du point de vue du récepteur utilisateur, cela se fait naturellement à travers les messages de navigation, en particulier les almanachs, qui sont mis à jour de façon à refléter l'arrivée de tout nouveau satellite.

Maintenance des satellites

Il est nécessaire de réaliser un certain nombre d'opérations de maintenance sur les satellites, en particulier pour assurer le maintien de la performance des horloges embarquées et de la position orbitale des satellites.

La maintenance des horloges embarquées implique, par exemple, des basculements d'horloge — lorsque l'horloge active tombe en panne, une horloge en redondance est activée en remplacement —, et le réglage des horloges au césium. De telles opérations sont nécessaires environ une fois par an pour chaque satellite et impliquent une indisponibilité du satellite pouvant aller de quelques heures à quelques jours.

Les manœuvres de maintien à poste des satellites sont indispensables à la préservation de la géométrie de la constellation. En effet, sous les effets de différentes forces perturbatrices, telles que l'attraction de la Lune et du Soleil, la pression du flux des particules solaires ou les irrégularités de l'attraction terrestre, les orbites de chaque satellite GPS dérivent petit à petit de leurs caractéristiques nominales, et il est nécessaire d'effectuer une manœuvre orbitale afin de replacer chaque satellite sur son orbite exacte au sein de la constellation.

Les perturbations étant variables en fonction de la position du satellite dans la constellation, la fréquence des manœuvres varie en fonction de chaque satellite. Du point de vue de l'utilisateur, ces manœuvres entraînent environ une fois par an une indisponibilité du satellite pendant quelques heures.

Contrôle de la SA

Les opérations d'activation et de désactivation de la SA sont exceptionnelles. La dernière a eu lieu en 2000. Cette opération, destinée à supprimer la SA, a été programmée à l'avance et appliquée simultanément à tous les satellites.

Lorsque ces opérations sont programmées, elles sont généralement annoncées préalablement à la communauté des utilisateurs par l'intermédiaire des NANU (Notice Advisories to Navstar Users). Ces communications sont librement accessibles, par exemple sur le site des gardes-côtes américains (US Coast Guards), à l'adresse *www.navcen.uscg.goc/gps.*

Conclusion

Mis en place au début des années 1980 et totalement opérationnel depuis les années 1990, le système GPS est devenu *de facto* le premier standard de la navigation par satellite, à tel point que son nom est utilisé de façon générique pour parler de cette navigation.

Cependant, du fait de l'arrivée de Galileo et d'autres systèmes de navigation par satellite et de la modernisation du GPS, le standard unique installé depuis plus d'une décennie est désormais remis en cause.

Nous présentons au chapitre suivant ces autres systèmes, et en premier lieu Galileo, avant de conclure sur l'interopérabilité entre les différents standards du point de vue de l'utilisateur.

5

Galileo

Galileo est le nom de l'initiative européenne pour la mise en place d'un système global de navigation par satellites.

Initié au début des années 1990 puis développé conjointement par l'Agence spatiale européenne (ESA) et la Commission européenne, le programme Galileo consiste en la mise en place d'une infrastructure globale constituée de trente satellites, d'un vaste réseau de stations sol mondialement réparties et de deux centres de contrôle en Europe, ainsi que de centres dédiés à la fourniture des différents services.

Galileo offrira six services différents, utilisant plusieurs signaux répartis sur trois bandes de fréquence distinctes.

Les services et le signal Galileo

Galileo est conçu pour offrir six services aux usagers dotés de récepteurs. Ces services sont fournis par l'intermédiaire des signaux diffusés par l'ensemble des satellites de la constellation. La structure du signal et des données diffusées est adaptée aux spécificités de chaque service.

Les signaux diffusés par les satellites Galileo utilisent les fréquences suivantes :

- E5a et E5b, respectivement centrés sur les fréquences 1 176 MHz et 1 207 MHz ;
- E6-A et E-B, multiplexés et centrés sur la fréquence 1 279 MHz ;
- L1-A et L1-B, multiplexés et centrés sur la fréquence 1 575 MHz.

Les services Galileo

Les services Galileo sont appelés OS (Open Service), SoL (Safety of Life), PRS (Public Regulated Service), CS (Commercial Service), SAR (Search and Rescue) et ERIS (External Regional Integrity Service).

L'utilisateur pourra obtenir un positionnement avec les services OS et SoL (en accès libres) et PRS (en accès restreint). Les autres services, CS, SAR et ERIS ne fournissent pas de positionnement, mais consistent à diffuser des informations complémentaires. Ainsi, si l'intégrité (ou la garantie) du positionnement sera fournie globalement par l'opérateur Galileo à travers les services SoL et PRS, des opérateurs régionaux pourront assurer eux-mêmes une intégrité régionale avec les services ERIS.

Le service CS consiste essentiellement à fournir des données à valeur ajoutée, dont la définition est totalement flexible. Quand au service SAR, il est dédié à la diffusion de données pour les opérations de recherche et d'assistance.

Le service OS (Open Service)

Il s'agit du service de positionnement et de synchronisation de base, comparable au service GPS SPS utilisé par tous les récepteurs grand public, mais offrant de meilleures performances que le GPS actuel, notamment grâce à l'utilisation de plusieurs fréquences, ce qui sera également le cas du futur GPS modernisé.

Son accès est libre, et il est disponible sur l'ensemble du globe. Il est destiné à toutes les applications grand public.

Selon la complexité et le coût du récepteur et les performances recherchées, le service OS peut être obtenu avec :

- un récepteur monofréquence utilisant la fréquence E5a seule, E5b seule ou L1-B seule ;
- un récepteur bifréquence utilisant les fréquences E5a et L1-B.

Les performances de positionnement et de synchronisation du service OS sont les suivantes (dans les cas d'utilisation en environnement dégagé) :

- précision de positionnement horizontal (RMS) : 10-12 m (récepteur monofréquence) à 2-3 m (récepteur bifréquence) ;
- précision de positionnement vertical : 15-17 m (récepteur monofréquence) à 4 m (récepteur bifréquence) ;
- précision de la synchronisation par rapport au temps Galileo : entre 1 µs (micro-seconde) et quelques dizaines de nanosecondes selon la complexité du récepteur ;
- temps de fix : entre 30 s (démarrage à chaud) et 3 min (démarrage à froid).

Le service SoL (Safety of Life)

Le service SoL est destiné aux applications exigeant une forte sûreté de fonctionnement, comme la navigation aérienne. Comme le service OS, il utilise les fréquences L1-B et E5b mais, grâce à la diffusion de données complémentaires d'intégrité, l'usager obtient une garantie sur les performances de positionnement et est averti en moins de six secondes en cas de dégradation anormale des performances. Il est disponible sur l'ensemble du globe.

Les performances de précision de positionnement et de temps de fix sont équivalentes à celle du service OS pour les récepteurs bifréquence.

Les performance complémentaires d'intégrité suivantes sont assurées :

- erreur de positionnement maximale garantie : 12 m (horizontal) et 20 m (vertical) ;
- temps d'alarme : 6 s.

Le service PRS (Public Regulated Service)

Le service PRS utilise les signaux L1-A et E6-A.

Il est destiné à des applications gouvernementales, et son accès est contrôlé. Pour cela, le signal est crypté et n'est rendu disponible qu'aux seuls usagers habilités pour son utilisation.

Le service CS (Commercial Service)

L'objectif du service CS est d'apporter des services complémentaires au service de positionnement de base OS grâce à un canal de diffusion de données utilisant la fréquence E6. Cela permettra à des fournisseurs de services de développer des applications fondées sur le positionnement Galileo.

Le récepteur CS pourra en outre effectuer des mesures de distance supplémentaires avec le signal E6-B, dont l'accès est contrôlé, afin d'améliorer ses performances de positionnement.

Le service SAR (Search And Rescue)

Le positionnement par satellite devient une composante essentielle dans les opérations de recherche pour le sauvetage et l'assistance. Cependant, ce positionnement n'est pas suffisant en lui-même. Il faut qu'un centre d'assistance puisse recueillir les messages de détresse, indiquant la position du terminal utilisateur, en provenance des usagers en difficulté, et transmettre en retour à l'usager un accusé de réception. C'est l'objectif du service SAR de Galileo.

Ce service s'appuie, d'une part, sur des équipements embarqués à bord de chaque satellite Galileo, recueillant et transmettant les signaux de détresse vers des centres de traitement des appels au sol, et, d'autre part, sur les signaux Galileo L1-B, qui intègrent dans leur données les messages « accusé de réception », qui peuvent dès lors être reçus par les utilisateurs dotés d'un récepteur Galileo de type OS.

Le service ERIS (External Regional Integrity Service)

Grâce à la diffusion de données complémentaires d'intégrité sur l'ensemble du globe, le service SoL offre un contrôle et une garantie sur les performances de positionnement. Ce contrôle étant assuré par les opérateurs du système Galileo, et la garantie étant fournie par des autorités européennes, cela n'est pas forcément compatible avec le développement de services « certifiés » dans les autres régions du globe, pour des raisons de souveraineté et de responsabilité.

C'est la raison pour laquelle le système Galileo offre la possibilité à des régions de développer leur propre système de contrôle d'intégrité et d'utiliser les satellites Galileo comme supports à la diffusion de ces données dans la région concernée. L'infrastructure associée est détaillée au chapitre 6, avec les autres systèmes d'augmentation régionale.

Les signaux Galileo

Les services Galileo reposent sur l'utilisation de mesures de distance effectuées sur les signaux Galileo et l'exploitation de données transmises par les satellites.

Les signaux Galileo se caractérisent donc par :

- la structure de la modulation, avec le type de code utilisé (permettant au récepteur usager d'effectuer une mesure de distance) et le débit des données diffusées à l'utilisateur ;
- la structure des messages de données permettant à l'usager d'accéder aux différents services.

Codes et débits de données des signaux Galileo

Nous avons vu que les signaux Galileo se répartissaient sur les fréquences E5a, E5b, E6 et L1 et que les signaux E6 et L1 étaient eux-mêmes décomposés en signaux E6-A, E6-B et L1-A, L1-B.

Chaque composante de ces signaux transporte sa propre modulation, et donc son propre code, sur lequel le récepteur peut effectuer une mesure de distance. De plus, chaque composante transporte des données Galileo, selon un débit défini par conception.

Le tableau 5.1 récapitule ces caractéristiques pour les différents signaux Galileo.

Tableau 5.1 – Structure des signaux Galileo

Signal	Fréquence de la porteuse	Code	Débit des données
E5a	1 176 MHz	10 Mchip/s	25 bit/s
E5b	1 207 MHz	10 Mchip/s	125 bit/s
E6-A	1 279 MHz	5 Mchip/s	55 bit/s
E6-B	1 279 MHz	5 Mchip/s	500 bit/s
L1-A	1 575 MHz	2,5 Mchip/s	55 bit/s
L1-B	1 575 MHz	1 Mchip/s	125 bit/s

> **Informations binaires, taux du code et chips**
>
> Les codes sont caractérisés par leur taux, qui est le nombre d'informations binaires (0 ou 1) transmis par seconde. Contrairement aux données numériques couramment utilisées, ces informations binaires représentent non pas le codage d'une information, mais uniquement une séquence de 0 et de 1. Pour ne pas les confondre avec les données numériques, dont le débit de 0 ou 1 est caractérisé en bit par seconde, on utilise le terme « chip » afin de caractériser l'information binaire 0 ou 1 du code, et l'on parle de taux du code pour caractériser son débit d'informations binaires. Un code dont le taux est de 10 Mchip/s représente donc un flux de 10 millions de valeurs 0 ou 1 en une seconde.

Cette présentation reste toutefois simplifiée. En effet, en plus des composantes présentées au tableau 5.1, les signaux Galileo intègrent des canaux dits pilotes, qui transportent uniquement le code, sans données de navigation, et permettent aux récepteurs d'améliorer les performances d'acquisition du code en environnement difficile, par exemple à travers des obstacles.

Messages et données Galileo

Les messages Galileo contiennent les informations nécessaires aux récepteurs utilisateur pour accéder aux différents services. On parle de données Galileo transmises sous forme de messages.

Ces messages sont regroupés en quatre catégories :

- F/Nav : permettent d'accéder au service OS.
- I/Nav : permettent d'accéder aux services SoL, SAR et ERIS.
- C/Nav: permettent d'accéder au service CS.
- G/Nav : permettent d'accéder au service PRS.

Ces messages peuvent eux-mêmes contenir plusieurs types de données :

- Données de navigation : il s'agit des données nécessaires au positionnement, comme expliqué au chapitre 1. Chaque satellite transmet ses propres éphémérides, permettant ainsi au récepteur de calculer la position précise du satellite à chaque instant, les almanachs de la constellation, permettant de calculer les positions approchées de tous les satellites de la constellation, des donnés de correction des effets ionosphériques, etc.
- Données d'intégrité : il s'agit des données permettant de garantir la précision du positionnement. Ces données incluent les alarmes en cas de détection d'erreurs.
- Données SAR : ce sont les accusés de réception des messages de détresse, destinés à chaque terminal SAR ayant déclenché une demande d'assistance.
- Données de communication : elles sont produites par des fournisseurs de services afin d'offrir des services fondés sur le positionnement ou des données de gestion du service, comme pour la gestion du service PRS.

Ces données sont donc organisées en messages, et ces messages sont diffusés sur les différents signaux Galileo en fonction des services qu'ils supportent. Cette répartition des messages sur les différents signaux, ainsi que la structure interne des messages ont été optimisés afin d'améliorer les performances pour l'utilisateur, par exemple en cas de perte temporaire de message ou de premier accès au service.

Le tableau 5.2 présente la répartition entre les services, les messages et les signaux Galileo.

Tableau 5.2 – Répartition des messages, services, signaux et données Galileo

Message	Service	Signal	Type de données			
			Navigation	Intégrité	SAR	Communication
F/Nav	OS	E5a	x			
I/Nav	OS/SoL/ERIS	E5b, L1-B	x	x	x	
C/Nav	CS	E6-B				x
G/Nav	PRS	E6-A, L1-A	x	x		x

La figure 5.1 illustre la structure des signaux Galileo et indique sur quels signaux sont fournis les différents services de positionnement Galileo.

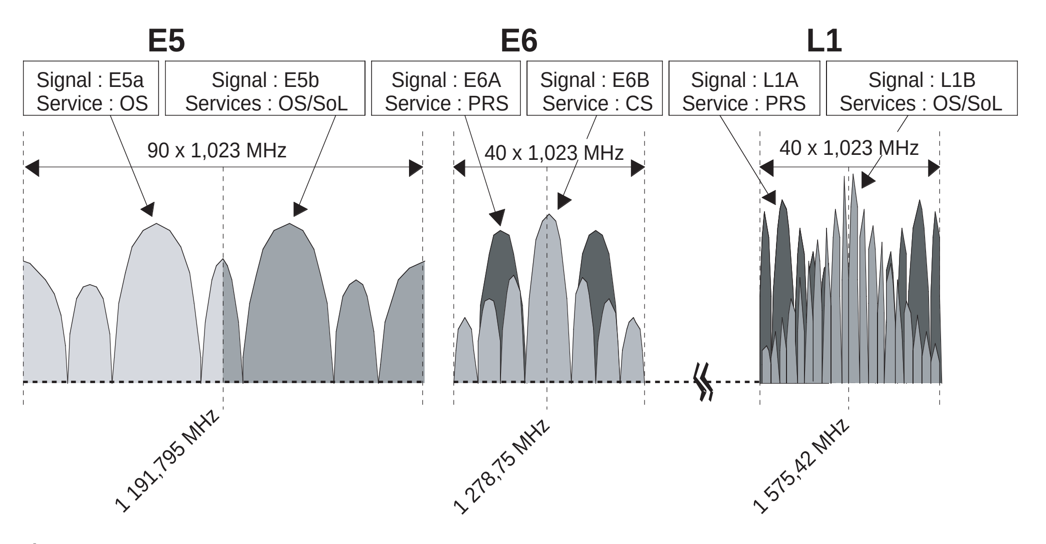


Figure 5.1

Structure des signaux Galileo

L'infrastructure Galileo

Galileo est un système complexe, distribué et déployé sur de nombreux sites autour du monde. Intégrant une constellation de trente satellites, il s'interface avec de nombreuses communautés d'utilisateurs différents.

Galileo intègre un grand nombre de technologies, en particulier dans les domaines de l'informatique, des télécommunications, du traitement du signal, des systèmes spatiaux et de la sécurité.

Le cœur du système Galileo comporte trois composantes, ou segment :

- segment spatial, c'est-à-dire la constellation de satellites ;
- segment sol de contrôle satellite, ou GCS (Ground Control System) ;
- segment sol de mission, ou GMS (Ground Mission System).

De plus, différents centres de fourniture de services viennent s'interfacer entre ces trois composantes centrales et les usagers, l'ensemble constituant l'infrastructure Galileo au sens large illustrée à la figure 5.2.

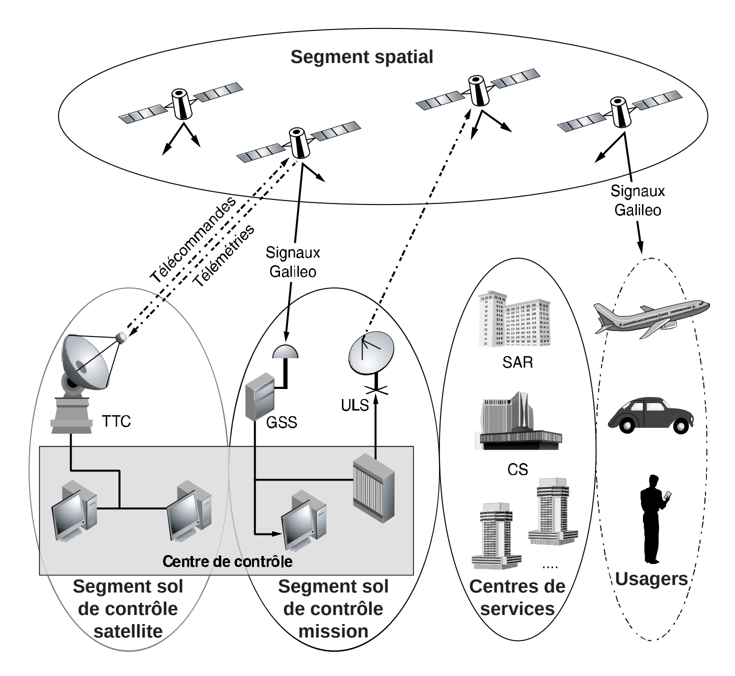


Figure 5.2

L'infrastructure globale Galileo

Le segment spatial

Comme indiqué précédemment, la constellation Galileo est constituée de trente satellites, dont trois sont en secours *(voir plus loin).*

Le déploiement de la constellation débute avec les premiers satellites prototypes, Giove A et Giove B, puis continue avec le lancement des quatre premiers satellites opérationnels du programme IOV (In-Orbit Validation). La totalité des satellites est mise en place dans le cadre du déploiement FOC (Full Operational Capability).

La constellation Galileo

Les satellites Galileo sont positionnés à une altitude de 23 222 km et évoluent sur des orbites circulaires inclinées à 56° par rapport à l'équateur. Ils sont répartis dans trois plans orbitaux différents, comprenant chacun dix satellites. Parmi ces dix satellites, neuf sont utilisés pour assurer les performances des différents services, et un est conservé comme satellite de secours, activé en cas de défaillance d'un satellite dans le plan où il se trouve. Pour remplacer un satellite défaillant, le satellite de secours doit être déplacé sur la position du satellite à remplacer. Cette opération prend généralement une semaine.

Les propriétés de la constellation ont été définies de façon à optimiser les performances des services de positionnement et le coût du maintien en conditions opérationnelles, ainsi qu'à minimiser le nombre de manœuvres nécessaire au maintien de la géométrie.

Les satellites étant soumis à des forces perturbant leur mouvement autour de la Terre (irrégularité de la forme et de la densité de la Terre, attraction du Soleil et de la Lune, pression du vent solaire, etc.), ils dérivent petit à petit par rapport à leur position dans la constellation. Il faut donc les maintenir dans une fenêtre dite de *maintien à poste*. Avec les orbites sélectionnées pour Galileo, il est nécessaire de réaliser une manœuvre de remise à poste en principe tous les cinq ans pour chaque satellite.

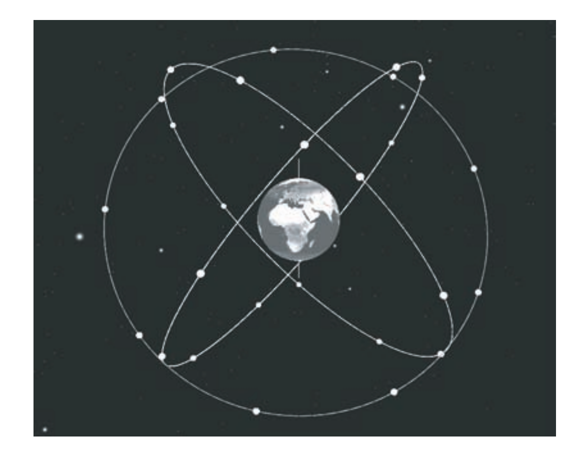


Figure 5.3
Géométrie de la constellation Galileo (vue réalisée avec SatOrb, Sup'Aéro)

La figure 5.3 illustre la géométrie de la constellation Galileo.

Placés sur des orbites circulaires de 29 600 km de rayon, c'est-à-dire à 23 222 km d'altitude, les satellites Galileo effectuent une révolution complète autour du globe en 14,4 h. La géométrie de la constellation se répète parfaitement au bout de dix jours.

La figure 5.4 illustre la répartition des satellites Galileo autour du monde, à un instant donné. La figure illustre également la zone de visibilité du satellite 27 au même instant, ainsi que sa trace au sol. Cette trace correspond à la trajectoire décrite par le satellite 27 pendant une orbite avant et une orbite après l'instant considéré (soit pendant environ une journée).

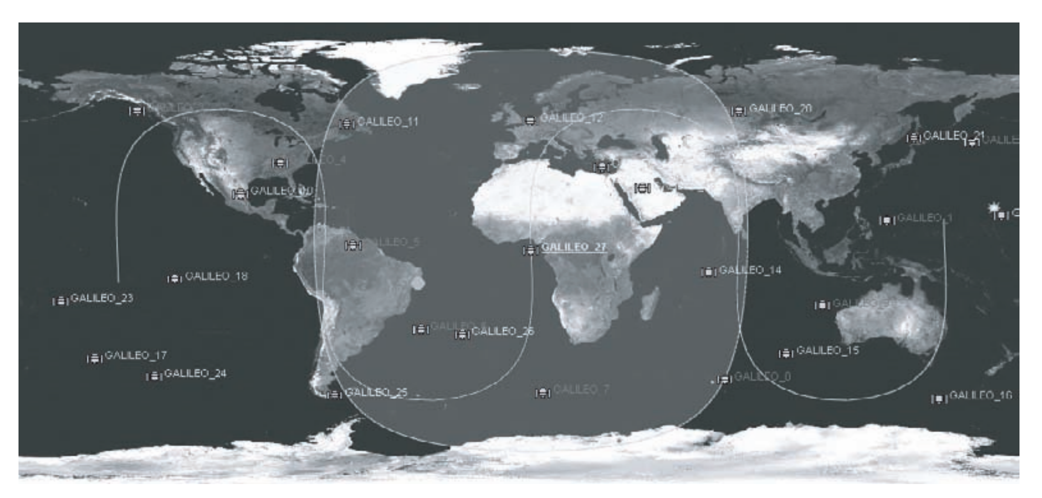


Figure 5.4
Trace au sol et zone de visibilité d'un satellite Galileo (source SatOrb, Sup'Aéro)

Les satellites Galileo

Le premier satellite Galileo a été mis en orbite en décembre 2005. Il s'agit du premier des deux prototypes Giove A et Giove B, qui sont développés afin de valider les technologies principales des satellites Galileo.

Après ces deux prototypes, une première constellation de quatre satellites sera mise en place dans le cadre de la phase dite IOV (In Orbit Validation). La constellation complète de satellites opérationnels sera déployée entre 2008 et 2012.

Les prototypes Giove A et Giove B

Le lancement des prototypes Giove A et Giove B répond à deux exigences :

- Émettre le signal Galileo dans les bandes de fréquences réservées au système européen de navigation par satellite. Pour obtenir le droit exclusif de diffuser les signaux Galileo sur les fréquences qui lui sont allouées, l'Europe s'est engagée auprès des organismes de réglementation internationaux des télécommunications spatiales à diffuser les premiers signaux Galileo avant juin 2006.
- Valider un certain nombre de technologies critiques avant le développement en série de l'ensemble des satellites de la constellation, en particulier les horloges atomiques embarquées et la résistance des composants à l'environnement spécifique des orbites GPS et Galileo.

Le prototype Giove A a été mis en orbite par une fusée russe Soyouz. Il a été réalisé par la société anglaise SSTL (Surrey Satellite Technology Limited). D'un poids de 450 kg, il embarque deux horloges atomiques au rubidium. La configuration du satellite Giove A en orbite est illustrée à la figure 5.5.

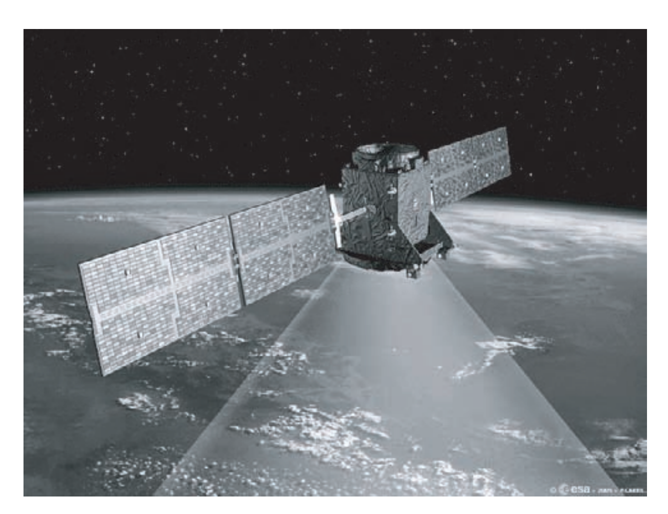


Figure 5.5
Satellite Giove A (source ESA)

Le satellite Giove B, réalisé par le consortium industriel européen Galileo Industries, doit être mis en orbite fin 2006. Il doit embarquer un prototype d'horloge atomique hydrogène maser, dix fois plus stable que les horloges au rubidium, et deux horloges au rubidium.

La configuration du satellite Giove B en orbite est illustrée à la figure 5.6.



Figure 5.6
Satellite Giove B (source ESA)

Les satellites opérationnels

Les premiers satellites opérationnels sont développés dans le cadre de la phase dite IOV (In-Orbit Validation) du programme de développement de Galileo. Il s'agit d'une première tranche de quatre satellites, qui doivent chacun embarquer deux horloges rubidium et deux horloges hydrogène maser.

Les satellites ont une masse au lancement de 720 kg et sont conçus pour avoir une durée de vie de douze ans. Les satellites déployés ensuite pour atteindre la configuration FOC (Full Operational Capability) devraient être sensiblement identiques aux satellites IOV.

Chaque satellite comporte deux parties principales :

- La charge utile : il s'agit des équipements contribuant directement à la mission confiée au satellite. Cela comprend le système d'horloges atomiques, les équipement de génération des messages et des signaux, ainsi que les antennes de transmission des signaux Galileo. Une antenne spécifique est dédiée au service SAR.
- La plate-forme : elle consiste à assurer toutes les fonctions nécessaires au bon fonctionnement de la charge utile, à savoir la structure, le contrôle thermique, le contrôle d'attitude (pour maintenir le satellite face à la Terre), le contrôle d'orbite (pour

repositionner le satellite au sein de la constellation), le générateur électrique (qui comprend les panneaux solaires déployés ainsi que les batteries), le système de communication avec les antennes au sol et le système informatique de contrôle du satellite.

La figure 5.7 illustre une vue d'artiste de la configuration déployée de l'un des satellites opérationnels Galileo

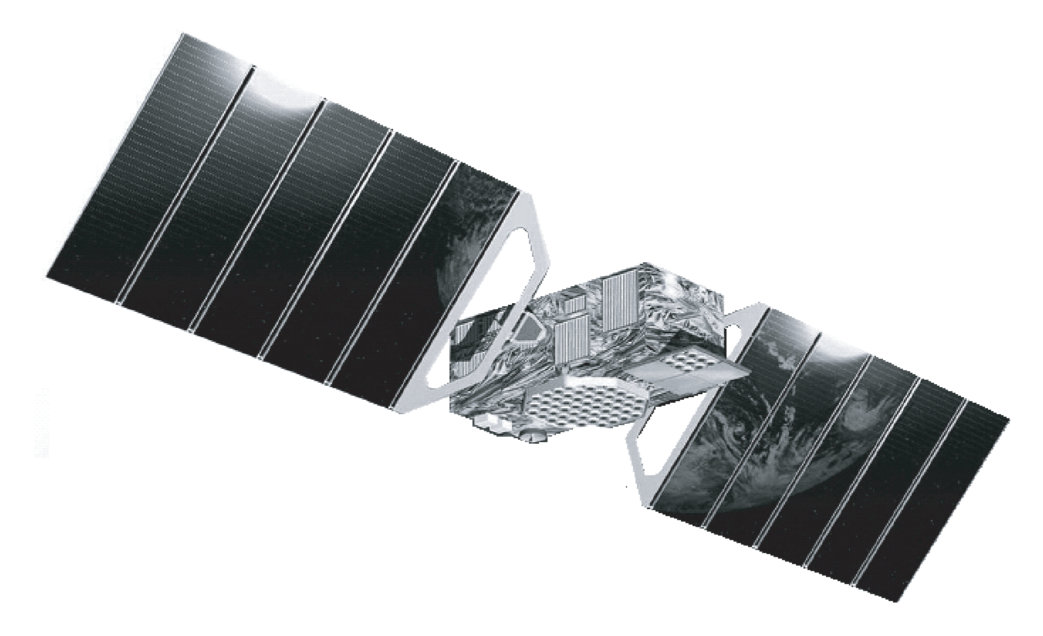


Figure 5.7
Satellite opérationnel Galileo (source ESA)

Les satellites sont conçus pour pouvoir être lancés en grappe, plusieurs satellites étant mis en orbite avec le même lanceur. Ainsi, un seul lancement d'Ariane 5 permettra de mettre en orbite six satellites Galileo. Afin de diversifier les sources possibles de lancement, le satellite est également conçu pour être lancé par grappes de deux avec d'autres lanceurs, comme Soyouz.

Chaque satellite diffuse en permanence l'ensemble des signaux Galileo, ainsi que les données de navigation, en particulier les éphémérides précises, le concernant. Par contre, les données d'intégrité nécessaires pour fournir les services SoL et ERIS, ainsi que les données SAR et CS, ne sont transmises que lorsque le satellite est connecté au segment sol de la mission par l'intermédiaire d'un vaste réseau d'antennes déployées sur le globe.

Le segment sol

Le segment sol de Galileo permet de réaliser les fonctions suivantes :

- assurer le contrôle de l'ensemble de la constellation Galileo et de chaque satellite individuellement ;
- produire les données nécessaires aux récepteurs utilisateur pour accéder aux différents services Galileo ;
- assurer la supervision et le contrôle de l'ensemble de l'infrastructure Galileo et des services associés.

Contrôle des satellites et de la constellation

Chaque satellite de la constellation Galileo doit être contrôlé de façon à assurer en permanence sa disponibilité pour fournir les signaux et les données attendues par les récepteurs utilisateur.

Ces opérations de contrôle consistent à effectuer une surveillance de routine de l'état de santé de chaque satellite et à réaliser des opérations planifiées de maintenance ou encore des opérations spéciales en cas de panne.

Le contrôle de la constellation consiste à assurer le maintien des propriétés géométriques de la constellation (le DOP), de façon à garantir que les services de positionnement, dont la performance est directement influencée par le DOP, restent de qualité constante sur l'ensemble du globe.

Pour cela, des opérations de mise hors service des satellites en fin de vie et de mise en service de nouveaux satellites doivent être effectuées. De plus, du fait des différentes forces perturbatrices, chaque satellite dérive lentement par rapport à sa position idéale dans la constellation. Environ tous les cinq ans, une manœuvre est nécessaire pour maintenir le satellite correctement à poste et ainsi garantir la géométrie de la constellation.

L'infrastructure au sol nécessaire au contrôle des satellites est constituée des installations suivantes, illustrées à la figure 5.8 :

- Deux centres de contrôle situés en Europe, chacun pouvant assurer le remplacement de l'autre, opérés vingt-quatre heures sur vingt-quatre.
- Cinq stations TTC (Tracking, Telemetry and Command) de communication, qui seront déployées en Scandinavie, à La Réunion, à Tahiti, à Nouméa et dans la zone guyanaise, utilisant des antennes de plus de 10 m de diamètre pour transmettre des télécommandes au satellite et recevoir ses messages de télémétrie. Le nombre et la répartition géographique de ces stations sur l'ensemble du globe permet d'assurer au

moins un contact pour chaque satellite au cours de chacune de ses orbites, soit toutes les quatorze heures.

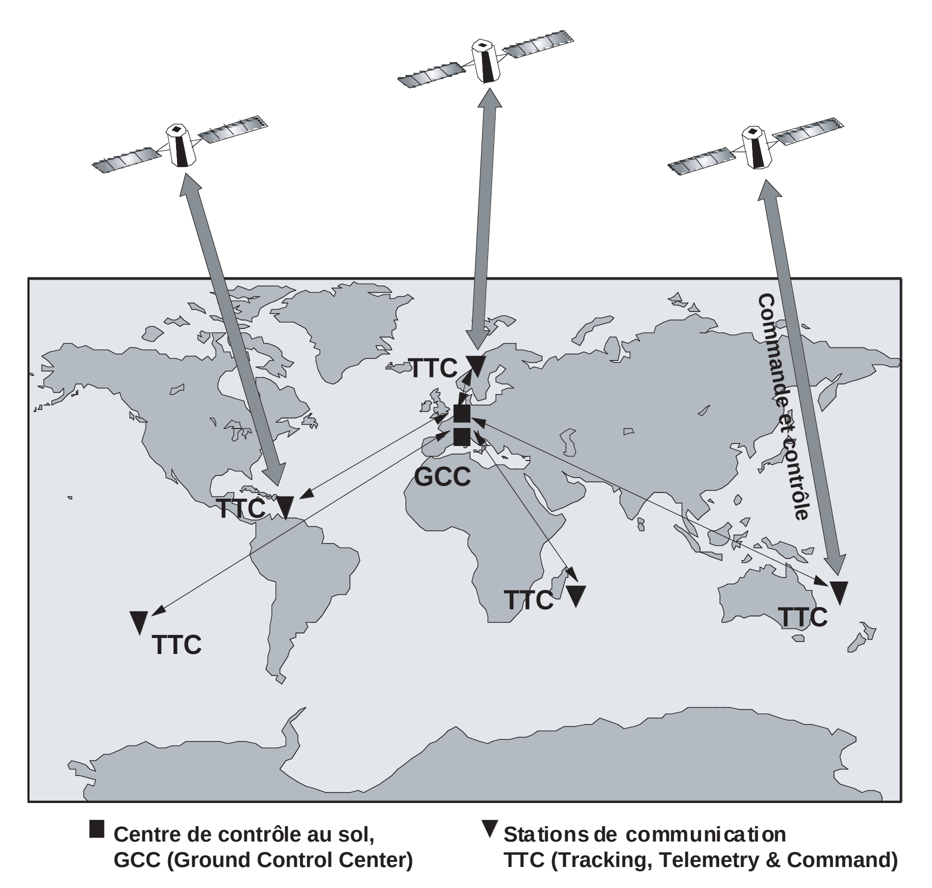


Figure 5.8

Infrastructure au sol pour le contrôle des satellites

Production du temps et des messages de navigation

Si la génération des signaux est assurée par les satellites, la production des données utilisées par les récepteurs utilisateur pour accéder aux services Galileo est réalisée par le segment sol de mission. Ces données sont ensuite transférées aux satellites, qui les intègrent dans leurs signaux.

Nous avons vu au chapitre 1 que le récepteur utilisateur devait obtenir les informations de position précises des satellites, ainsi que les écarts des horloges de chaque satellite par rapport à une horloge de référence système.

Génération du temps système GST (Galileo System Time)

La première fonction du segment sol de mission est de produire le temps de référence du système. Cette fonction est réalisée dans le centre de contrôle mission déployé en Europe grâce à la mise en place d'un ensemble d'horloges atomiques, de type hydrogène maser et rubidium.

Ces horloges sont maintenues dans un environnement très contrôlé, où la température doit être maintenue stable à 0,1° près. Par l'intermédiaire d'équipements spéciaux de transfert de temps, le temps GST est maintenu synchronisé avec le temps international TAI à quelques nanosecondes près.

Pour maintenir la continuité du temps système Galileo en cas de défaillance du centre de mission principal, un centre de mission de secours est également déployé en Europe. Dans ce centre de secours se trouve également un ensemble d'horloges contrôlées et maintenues en parfaite synchronisation, à quelques nanosecondes près, avec celles du centre de mission principal.

Production des messages de navigation

La position précise de chaque satellite peut être évaluée et prédite en utilisant des mesures de distance entre chaque satellite et un ensemble de stations de réception des signaux Galileo réparties dans le monde, ou GSS (Ground Sensor Stations), dont la position est parfaitement connue.

Ces mesures sont ensuite utilisées dans des algorithmes de calcul qui estiment les différentes forces agissant sur le mouvement des satellites. Ces algorithmes sont capables de fournir une prévision de la position de chaque satellite dans les heures suivantes à quelques dizaines de centimètres près.

Ces positions prédites sont traduites sous forme de messages, les éphémérides Galileo, à transmettre aux récepteurs utilisateur par l'intermédiaire des satellites et de leurs signaux.

Les mesures fournies par les stations de réception sont également utilisées par des calculateurs indépendants, qui contrôlent la qualité des signaux et des messages transmis par les satellites tels qu'ils sont reçus et utilisés par les récepteurs utilisateur.

Ces algorithmes sont capables de détecter en temps réel des erreurs dans ces signaux ou dans ces messages Galileo. Le cas échéant, ils produisent des messages d'alarme, c'est-à-dire des données d'intégrité du service SoL, qui garantissent une sécurité de fonctionnement et de précision pour les applications critiques, comme les transports aériens.

Ces données d'intégrité sont ensuite transmises aux usagers, également en temps réel, par l'intermédiaire des satellites et de leurs signaux. Le temps maximal entre l'apparition d'une erreur dans un signal ou un message d'un satellite Galileo et la transmission d'une alarme concernant ce satellite auprès de tous les usagers du globe est de 6 s.

Transmission des données

Les données collectées auprès des stations de réception réparties dans le monde sont acheminées en temps réel en moins d'une seconde dans les centres de contrôle mission européens par l'intermédiaire d'un vaste réseau de communication.

Les messages de navigation et d'intégrité produits par le centre de contrôle mission principal sont ensuite acheminés, également en temps réel, vers des stations de transmission ULS (Up-Link Stations) pour être communiqués aux satellites, qui, eux-mêmes, vont les diffuser vers l'ensemble des usagers à travers leurs signaux.

La figure 5.9 illustre l'infrastructure sol mise en place pour la génération des données de navigation et d'intégrité sur lesquelles sont fondés les différents services de navigation Galileo. Elle devrait comprendre jusqu'à neuf stations ULS et quarante stations GSS.

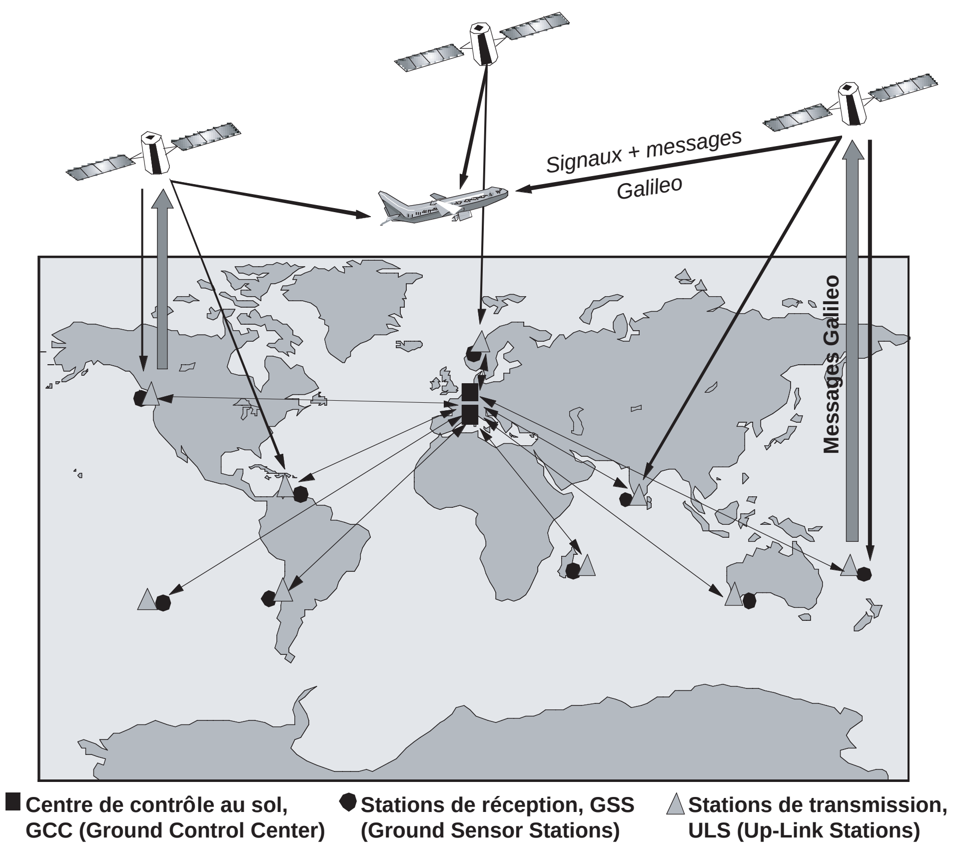


Figure 5.9

Infrastructure sol pour la génération des données de navigation

Les stations GSS ne sont pas toutes indiquées sur la figure, où seules les neuf stations GSS localisées sur les mêmes sites que les stations ULS sont illustrées.

Contrôle de la mission

C'est depuis le principal centre de contrôle mission que les opérateurs assurent en permanence la supervision du système, des services et de la mission de Galileo.

La planification des opérations de maintenance de l'ensemble de l'infrastructure, spatiale et sol ainsi que la surveillance permanente de l'état du système et des performances des services Galileo mobilisent des opérateurs spécialisés vingt-quatre heures sur vingt-quatre.

Infrastructure du service SAR

Le service SAR de recherche et d'assistance repose sur la mise en place des deux types de liens de communication suivants *(voir figure 5.10) :*

- *Forward Link :* les terminaux des usagers en difficulté transmettent un message de détresse, contenant une alarme et la position Galileo de l'usager, qui est reçu par les satellites Galileo en visibilité (1). Ceux-ci retransmettent en temps réel ces messages vers le centre de contrôle des opérations d'assistance (2). Les opérations de secours peuvent alors être déclenchées. Elles sont rendues plus efficaces par la connaissance de la position précise de l'usager en difficulté.

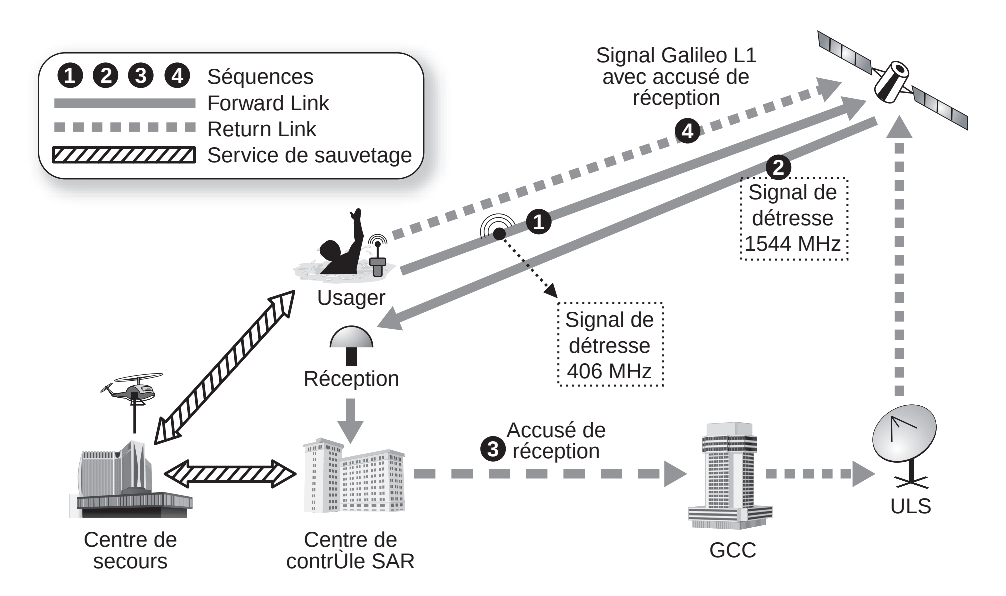


Figure 5.10

Infrastructure pour la fourniture du service SAR de Galileo

- *Return Link :* le centre de gestion du service SAR produit un accusé de réception pour chaque message d'alarme reçu puis communique ces accusés de réception aux centres de contrôle mission de Galileo (3). Ces accusés sont alors intégrés aux messages de navigation et d'intégrité qui sont transmis aux satellites puis diffusés à l'ensemble des usagers (4). L'utilisateur en difficulté qui a déclenché un appel de détresse est donc prévenu, par l'intermédiaire de son récepteur Galileo, que son alarme a bien été reçue et qu'il a été localisé.

Infrastructure du service CS

Le service commercial s'appuie sur les services ouverts OS (utilisant les signaux E5a, E5b et L1) pour offrir aux usagers autorisés l'accès au signal E6. L'accès à ce signal est protégé et réservé aux utilisateurs ayant souscrit au service CS. Ce signal permet au récepteur CS d'effectuer des mesures de distance sur une fréquence supplémentaire, permettant de développer certaines applications spécialisées de haute précision, et de recevoir les données propres au service CS.

Le contenu de ces données est défini par le gestionnaire du service CS (le concessionnaire Galileo). Leur diffusion assure une valeur ajoutée pour les usagers du service CS, qui est source de revenus pour le concessionnaire. Le concessionnaire peut s'appuyer à son tour sur des fournisseurs de services spécialisés, qui seront à l'origine de la génération de messages CS propres à leurs applications.

La figure 5.11 illustre l'ensemble de l'infrastructure mise en place pour assurer les services CS de Galileo.

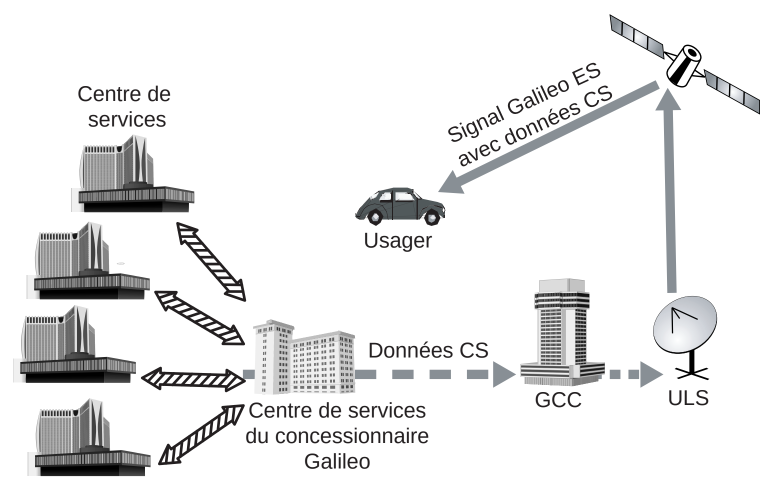


Figure 5.11

Infrastructure pour la fourniture du service CS de Galileo

Développement et opérations de Galileo

Alors que le GPS est en place depuis le milieu des années 1990, le système Galileo, lui, ne devrait atteindre sa configuration opérationnelle complète qu'en 2010-2012.

Un premier développement européen s'est achevé en 2004, le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), présenté au chapitre 6, qui est fondé sur le GPS et sur des équipements embarqués à bord de satellites de communication géostationnaires. Le développement d'EGNOS a permis de mettre en place des compétences et un environnement industriel prêts à s'engager dans le développement d'un système aussi complexe que Galileo. Les opérations et les extensions d'EGNOS s'inscrivent maintenant dans l'ensemble du programme Galileo.

Le développement des deux premiers satellites prototypes Giove A et B a été initié en 2003 par l'ESA et a conduit à la mise en orbite de Giove A fin 2005. Le deuxième satellite test, Giove B, doit être lancé à la fin de l'année 2006. À partir de 2009, le processus s'accélérera. Les satellites seront lancés par grappes de deux ou six, et le déploiement de la constellation de trente satellites devrait être achevé en 2011, date à laquelle l'exploitation du système et de ses services pourra débuter.

Comme expliqué précédemment, l'ensemble du développement et du déploiement du système Galileo comporte deux phases :

1. Phase IOV (In-Orbit Validation) : initiée en décembre 2004, elle doit permettre de déployer les quatre premiers satellites opérationnels ainsi qu'une grande partie du segment sol (deux stations TTC, cinq stations ULS, vingt stations GSS). Cette phase, financée par les institutions européennes (ESA et Commission européenne), devrait s'achever en 2009 pour peu que le développement du programme se déroule comme prévu. La maîtrise d'ouvrage (définition de la mission et financement du programme) est assurée par l'ESA et la Commission européenne, et la maîtrise d'œuvre (définition et développement du système) par le consortium européen Galileo Industries, qui rassemble les grandes industries du spatial européen.

2. Phase de déploiement vers le FOC (Full Operational Capability) : consiste à déployer le reste de l'infrastructure spatiale (jusqu'à trente satellites) et sol. Cette phase doit faire l'objet d'un accord de partenariat public-privé (PPP), par l'intermédiaire d'un contrat de concession entre les institutions européennes et un consortium de sociétés industrielles et bancaires. Ce consortium, la Galileo Operation Company, exploitera et développera le système et la constellation Galileo et en tirera les bénéfices commerciaux pendant vingt ans.

Ainsi, contrairement au système GPS, le système Galileo est développé, déployé et opéré par des institutions et sociétés civiles. La figure 5.12 illustre le principe d'organisation qui doit être mis en place pour le déploiement et les opérations de la configuration FOC de Galileo.

Une autorité institutionnelle européenne, le GSA (GNSS Supervisory Agency), qui est étroitement lié à la Commission européenne et à l'ESA, aura en charge de définir les grandes orientations stratégiques du système Galileo et d'établir le contrat de concession pour l'exploitation du système avec une société privée. Cette société tirera des revenus en provenance d'institutions financières et de fournisseurs de services et pourra ainsi assurer la maintenance et les opérations du système. Elle s'appuiera sur des sociétés privées pour les nouveaux développements, les opérations, la maintenance et le lancement des satellites.

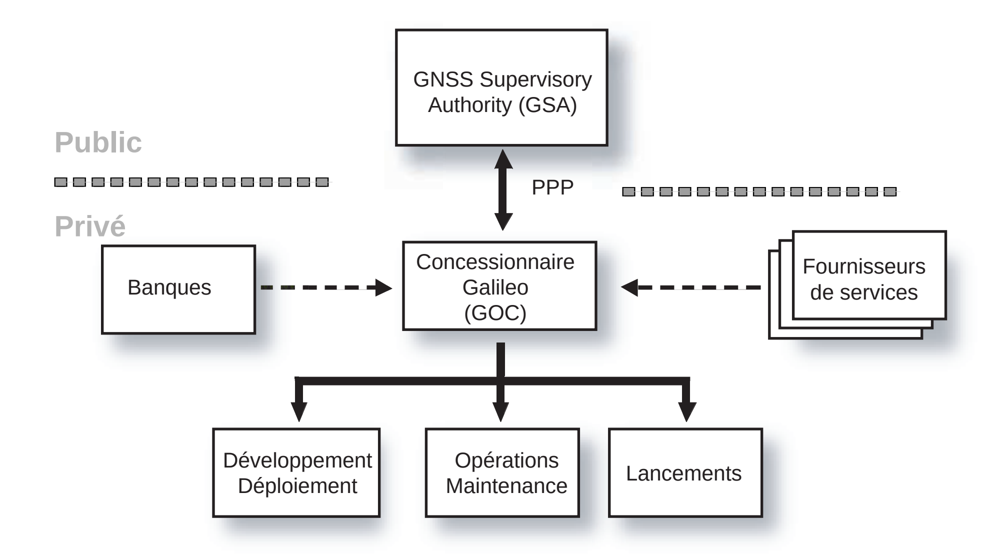


Figure 5.12
Organisation opérationnelle et de supervision du système Galileo

Conclusion

Le système Galileo doit apporter à l'Europe une souveraineté et une garantie de service dans les domaines de la navigation par satellite.

Offrant de multiples services adaptés à la diversité des applications de la navigation par satellite, le développement et les opérations de ce système complexe mobilisent les institutions européennes et l'ensemble des acteurs de l'industrie spatiale européenne.

6

Autres systèmes de navigation par satellite

GPS et Galileo ne sont pas les seuls systèmes à proposer des services de navigation par satellite.

Nous pouvons classer ces autres systèmes selon deux grandes catégories :

- Les systèmes de base, qui fournissent les signaux et les données nécessaires à un récepteur utilisateur pour se positionner. Nous présentons dans ce chapitre le système russe Glonass, qui est comparable au GPS et à Galileo.
- Les systèmes différentiels, qui s'utilisent en complément des systèmes de base. Il s'appuient sur un réseau de stations sol de référence pour calculer et délivrer des signaux et des données complémentaires à leurs usagers, apportant une amélioration des performances et une garantie de service. Il existe deux grandes catégories de systèmes différentiels, que nous abordons également dans ce chapitre : les systèmes différentiels régionaux, comme EGNOS ou WAAS, et les systèmes différentiels locaux.

Glonass (Global Navigation Satellite System)

Le système Glonass (Global Navigation Satellite System) est l'équivalent russe du GPS ou de Galileo.

Opéré par les forces spatiales russes, il fournit, comme le GPS, un service à usage militaire et un autre à usage civil.

Développé à partir des années 1970, le premier satellite a été lancé le 12 octobre 1982. Il a été suivi d'autres lancements, qui ont conduit à la mise en place, en janvier 1984, d'une première constellation de test de quatre satellites.

En 1988, l'Union soviétique a offert officiellement la possibilité d'utiliser les signaux Glonass pour des usages civils. La constellation a atteint le nombre de douze satellites en 1991, permettant de réaliser des tests intensifs du système et de déclarer le service opérationnel.

Le système Glonass est conçu pour apporter des performances comparables à celles du GPS en utilisant vingt-quatre satellites. Cette configuration complète n'a pas encore été atteinte à ce jour, par manque de financement.

Le nombre de satellites opérationnels en mai 2006 est de quatorze.

Les signaux Glonass

La structure des signaux Glonass diffère sensiblement de celle des signaux GPS et Galileo. Cela provient de choix de conception différents. Ainsi, les concepteurs de Glonass ont choisi une technique spécifique pour la séparation des différents signaux reçus par le récepteur.

Nous avons vu au chapitre 2 que le récepteur devait pouvoir séparer les différents signaux en provenance de tous les satellites en visibilité. Les satellites GPS comme Galileo émettent tous dans les mêmes bandes de fréquences, mais chacun avec une séquence de code différente. C'est ce que l'on nomme l'accès multiple à répartition en code, ou CDMA (Code Division Multiple Access). Cette répartition en code permet à chaque corrélateur dans le récepteur d'isoler un satellite afin d'effectuer une mesure de distance et de récupérer les données transmises par celui-ci.

Les satellites Glonass émettent tous avec la même séquence de code, mais sur une fréquence différente. C'est ce que l'on nomme l'accès multiple par répartition en fréquence, ou FDMA (Frequency Division Multiple Access). Cette technique est utilisée pour la diffusion de la télévision ou de la radio. Les satellites Glonass émettent donc sur des fréquences différentes, comme le font les différents émetteurs radio ou TV. Les récepteurs Glonass « syntonisent » sur ces fréquences de la même façon qu'un récepteur radio ou TV ajuste sa fréquence à la fréquence de l'émission qu'il souhaite recevoir.

Le choix du FDMA par rapport au CDMA résulte d'orientations techniques différentes des concepteurs. Le FDMA induit une complexité accrue des composants de la partie amont du récepteur, lequel doit traiter plusieurs fréquences différentes, mais simplifie les opérations de corrélation et d'acquisition. Il en résulte que les récepteurs Glonass sont généralement plus onéreux. En outre, une source d'interférence sur les signaux Glonass affecte la réception d'un nombre limité de satellites alors qu'une interférence centrée sur la fréquence GPS ou Galileo affecte la réception de tous les satellites en visibilité. Le comportement des récepteurs Glonass par rapport aux sources d'interférences est donc différent.

Les satellites Glonass émettent dans deux bandes de fréquences différentes, G1 et G2 (également nommées Glonass L1 et L2). Ces fréquences sont proches des fréquences GPS et Galileo, comme l'illustre la figure 6.1.

Chaque bande de fréquences G1 et G2 est découpée en douze fréquences d'émission. La constellation Glonass comprenant vingt-quatre satellites, chacune des douze fréquences est utilisée en fait par deux satellites. Pour éviter qu'un récepteur ne reçoive simultanément deux signaux de même fréquence en provenance de deux satellites différents, l'allocation des fréquences aux satellites est faite de telle façon que ces satellites soient opposés de part et d'autre de la Terre.

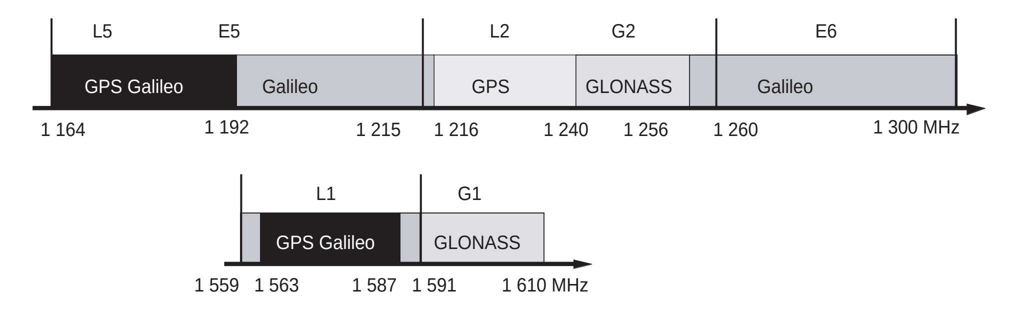


Figure 6.1
Fréquences utilisées par les satellites Glonass

Les signaux Glonass utilisent deux types de code :

- Le code C/A (Clear Access), en accès libre pour les applications civiles, qui est diffusé sur les fréquences G1.
- Le code P, diffusé sur les fréquences G1 et G2, dont l'accès est contrôlé et réservé aux utilisateurs militaires.

Deux types de messages de navigation sont également transmis, l'un avec le code C/A, l'autre avec le code P. Ces messages incluent les éphémérides précises permettant un calcul de la position du satellite, ainsi qu'un certain nombre de paramètres permettant de combiner les mesures GPS et Glonass (ces deux systèmes, comme nous le verrons au chapitre 7, sont fondés sur des référentiels géodésiques différents).

Le tableau 6.1 récapitule les caractéristiques des signaux Glonass sur les fréquences G1 et G2.

Tableau 6.1 – Structure des signaux Glonass

Signal	Fréquence de la porteuse	Code	Débit de données
G1	1 598-1 604 MHz	– C/A : 0,5 Mchip/s – P : 5 Mchip/s	50 bit/s 50 bit/s
G2	1 243-1 247 MHz	P : 5 Mchip/s	50 bit/s

Infrastructure du système Glonass

Dans sa configuration complète, la constellation Glonass comprend vingt et un satellites et trois satellites de secours positionnés en orbite, soit un total de vingt-quatre satellites en orbite.

Ces satellites sont positionnés dans trois plans différents, comme l'illustre la figure 6.2.

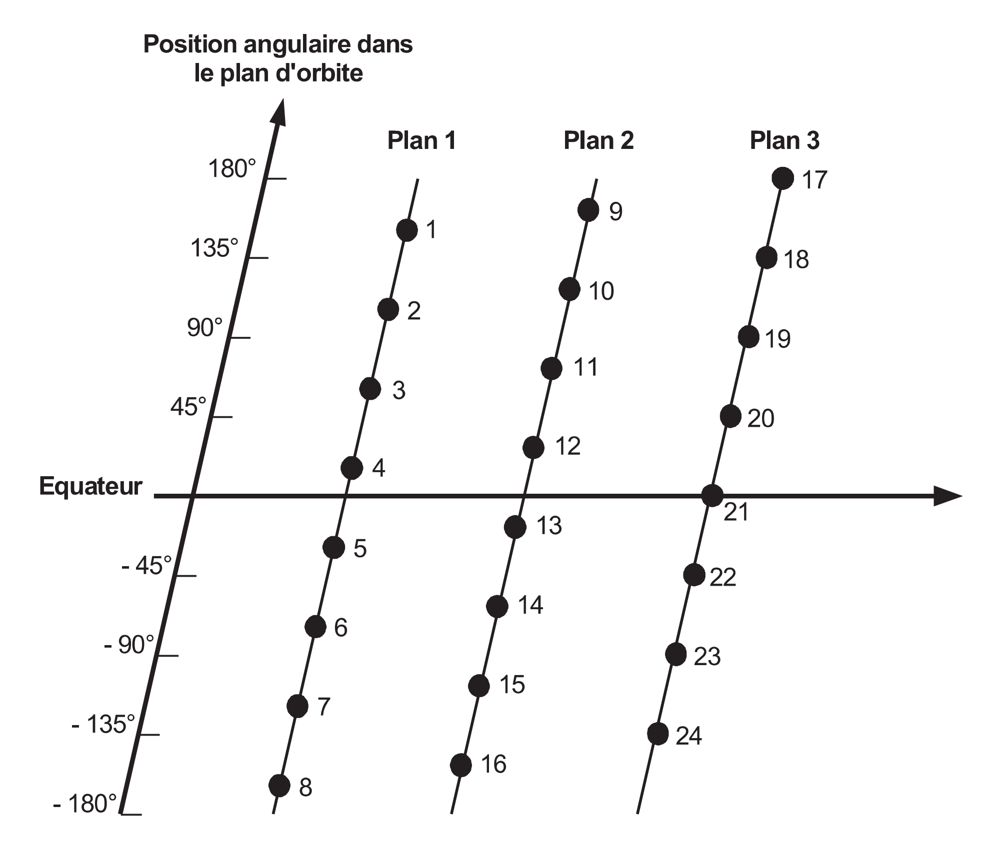


Figure 6.2

Configuration de la constellation Glonass complète

Les satellites sont positionnés sur des orbites circulaires, inclinées à 64,8˚ et à une altitude de 19 100 km. Chaque satellite Glonass effectue ainsi une révolution complète en 11 h 15 min.

Le choix d'une inclinaison plus importante que le système GPS (55˚) permet de fournir de meilleures performances aux latitudes élevées.

Les satellites Glonass sont mis en orbite par le lanceur Proton, qui peut transporter jusqu'à trois satellites en même temps.

Comme expliqué précédemment, le système Glonass n'est pas maintenu avec un niveau de déploiement complet. La configuration de la constellation en mai 2006 est illustrée à la figure 6.3. Les performances obtenues avec un récepteur Glonass sont donc très sensiblement dégradées par rapport aux performances offertes par le GPS depuis 1994.

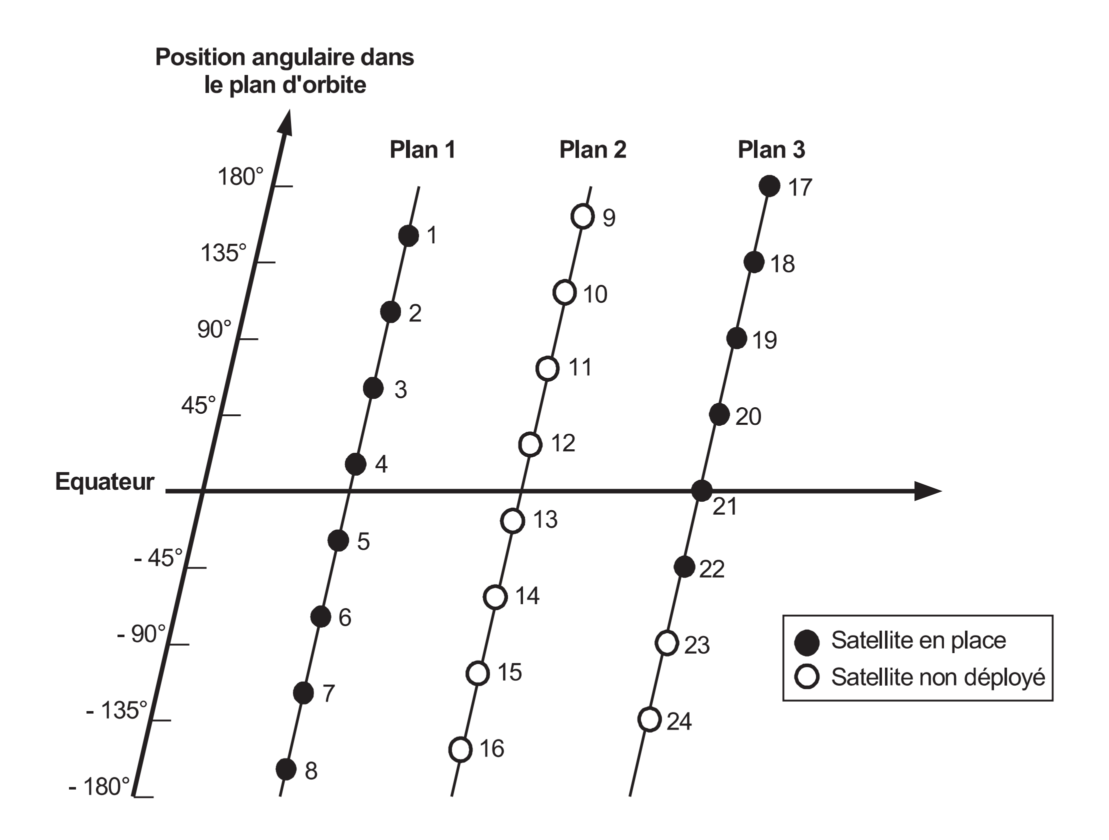


Figure 6.3
Configuration de la constellation Glonass au 22 mai 2006

La figure 6.4 précise l'âge des satellites Glonass opérationnels le 22 mai 2006. Nous pouvons remarquer que, depuis l'année 2000, la constellation Glonass est renouvelée par la mise en place d'un lancement de trois satellites à la fin de chaque année. En outre, nous observons qu'un des trois satellites lancés en décembre 2001 a été retiré du service.

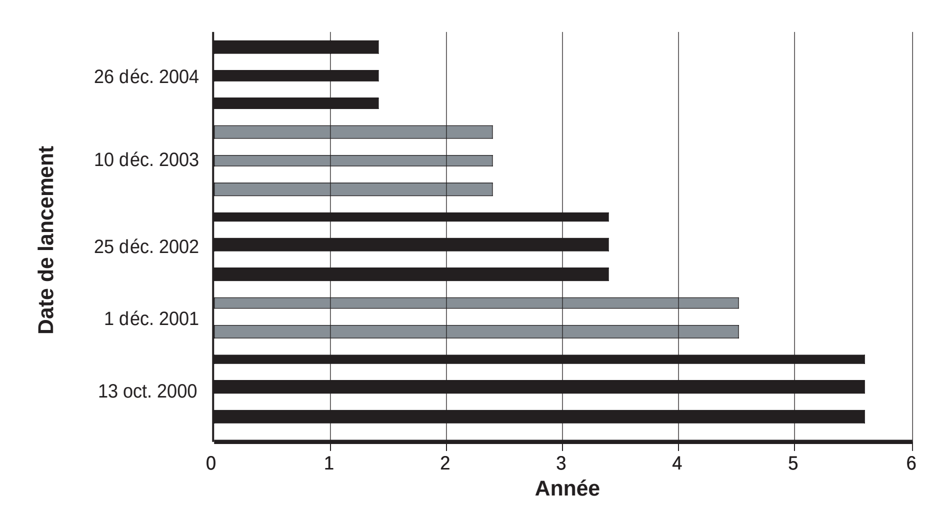


Figure 6.4
Âge des satellites Glonass au 22 mai 2006

Le segment sol de Glonass est constitué d'un centre de contrôle, situé à Krasnoznamensk, près de Moscou, et de plusieurs stations déployées sur le territoire russe. Ces stations permettent de recevoir les signaux émis par les satellites Glonass afin de calculer la position des satellites et de communiquer avec le satellite.

Le système Glonass utilise en outre des stations de mesure laser fournissant des mesures de distance très précises grâce à des réflecteurs laser embarqués sur les satellites. Ces mesures laser améliorent le calcul de position des satellites.

Les systèmes différentiels régionaux

Les systèmes de base GPS et Glonass présentent un certain nombre de limitations, en particulier en ce qui concerne l'intégrité de service. Ces limitations ont conduit au développement de systèmes d'augmentation, appelés systèmes différentiels, qui offrent une couverture régionale à partir de satellites géostationnaires diffusant des signaux de type GPS.

Seuls deux systèmes ont à ce jour été déployés : le WAAS aux États-Unis et EGNOS en Europe. De tels systèmes, au nom générique de SBAS (Satellite-Based Augmentation System), sont toutefois à l'étude ou en développement dans d'autres régions du globe, comme le Japon, la Chine, l'Inde, l'Afrique ou l'Amérique du Sud.

Il est également prévu de déployer des systèmes similaires, appelés de façon générique ERIS (External Regional Integrity Service), en complément du système global Galileo, les données ERIS étant diffusées par l'intermédiaire des signaux Galileo. ERIS et SBAS pourront être intégrés au niveau régional.

Missions et principes de fonctionnement

La principale mission des systèmes d'augmentation régionale est d'élargir les applications du système global (GPS, Glonass ou Galileo) dans des domaines où la sécurité des biens et des personnes est engagée. Il s'agit principalement des transports, pour lesquels la fonction de navigation met en jeu la vie des passagers et des équipages.

En effet, si les systèmes de navigation par satellite tels que le GPS, Galileo ou Glonass apportent un moyen unique de navigation pour tous les véhicules (avion, navire, train, camion, etc.), une défaillance d'un tel système centralisé pourrait conduire à des situations catastrophiques. La mise en place de systèmes indépendants de surveillance à l'échelle d'une région du globe permet de garantir les performances du service de positionnement dans cette région.

Comme l'illustre la figure 6.5, ces systèmes reposent sur un vaste réseau de stations de réception déployées dans la région considérée. Ces stations effectuent des mesures des signaux des satellites et les transmettent à un centre de calcul qui évalue en permanence la précision du service de positionnement délivré par les satellites.

En cas de détection d'une dégradation anormale de la précision de positionnement ou d'un mauvais fonctionnement d'un satellite, une alarme est déclenchée et transmise à l'ensemble des utilisateurs du service à l'aide de canaux de diffusion satellitaire.

Cette surveillance permanente apporte une garantie de la précision du service de positionnement : c'est ce qu'on appelle le service d'intégrité. Cette garantie s'évalue en terme de risque (de non-intégrité) et de temps d'alarme.

La sécurité des transports, qui engage la sécurité des personnes, est fortement réglementée. Les véhicules, procédures d'utilisation et systèmes de contrôle du trafic sont soumis à des vérifications par des autorités nationales de certification, comme les directions nationales des aviations civiles. La responsabilité de la sécurité des transports incombe en premier lieu à ces autorités.

Outre la vérification indépendante de la qualité du positionnement, les systèmes d'augmentation régionale permettent aux autorités nationales ou régionales (cas de l'Union européenne) en charge de la sécurité des transports de disposer de leur propre moyen de contrôle pour assurer une telle sécurité.

Les applications des transports aériens sont les premières concernées par ces exigences de garantie de service, ce qui explique la forte implication des autorités nationales de l'aviation civile, comme la FAA (Federal Aviation Administration) pour le développement du système WAAS aux États-Unis ou les aviations civiles européennes pour le système européen EGNOS.

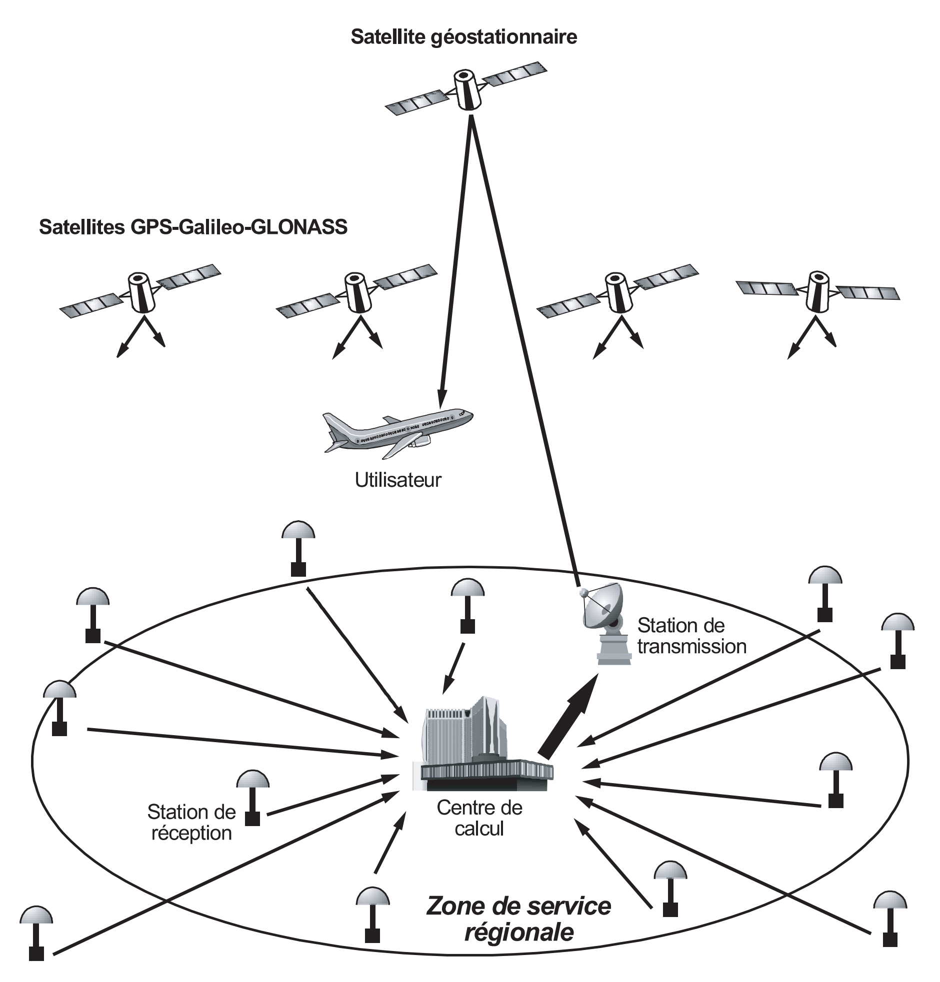


Figure 6.5

Principe de fonctionnement des systèmes d'augmentation régionale

EGNOS, WAAS et MSAS

Une première génération de systèmes d'augmentation régionale a été déployée aux États-Unis avec le WAAS (Wide Area Augmentation System) et en Europe avec EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service).

Ces systèmes ont été conçus à partir d'un standard commun, le SBAS (Satellite-Based Augmentation System), défini par des groupes d'experts mandatés à l'origine essentiellement par l'aviation civile américaine.

Ces deux systèmes fournissent des signaux et des services interopérables, l'un aux États-Unis, l'autre en Europe, qui permettent à un même récepteur conforme au standard SBAS d'accéder aux deux services.

Un système similaire au WAAS est en cours de développement pour fournir un service d'augmentation régionale au Japon : le système MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System).

Le standard SBAS

Le standard SBAS actuel repose sur un certain nombre de principes d'architecture communs au WAAS et à EGNOS. Il établit une définition détaillée du signal et des messages, autrement dit de l'interface entre l'infrastructure EGNOS ou WAAS et les récepteurs utilisateur.

Le signal standard SBAS est transmis depuis un satellite géostationnaire. Sa structure est similaire à celle d'un signal GPS.

La fréquence et le code sont ceux du signal GPS L1 C/A. Le signal standard SBAS est donc reçu par tous les récepteurs civils GPS en visibilité de ces satellites géostationnaires. Ce signal permet en outre d'effectuer des mesures de distance entre le satellite géostationnaire et le récepteur. Ces mesures peuvent être combinées aux mesures obtenues par le biais des satellites GPS, améliorant ainsi le DOP et la précision. Cependant, la moindre précision du positionnement des satellites géostationnaires (situés à 36 000 km d'altitude) par rapport à celle des satellites GPS (situés à 20 000 km d'altitude) limite quelque peu l'apport de ces mesures supplémentaires.

Les données sont transmises selon une structure spécifique, différente de celle des messages GPS, à un débit de 250 bit/s (contre 50 bit/s pour le GPS). Pour accéder aux services fournis par un SBAS, les récepteurs doivent être capables d'interpréter les messages spécifiques du standard SBAS.

L'essentiel du service fourni par les SBAS est apporté par les messages qui sont diffusés aux récepteurs utilisateur :

- **Messages de correction différentielle.** Les corrections, calculées en permanence dans les centres de calcul au sol, permettent de corriger les erreurs résiduelles de position et de synchronisation des satellites ainsi qu'une partie des erreurs dues aux effets ionosphériques. Ces corrections s'appliquent individuellement aux satellites GPS et Glonass. Obtenues grâce aux mesures effectuées depuis un vaste réseau de stations de réception au sol, elles améliorent la précision du service fourni par le GPS et Glonass. Dans le cas où le GPS active le dispositif de SA, les corrections différentielles atténuent en grande partie la dégradation volontaire de la précision du service GPS SPS.

- **Messages d’intégrité.** Ces messages permettent au récepteur utilisateur d’évaluer en permanence le degré de précision et la confiance avec laquelle il peut utiliser les informations de positionnement obtenues avec les satellites GPS et Glonass. Le cas échéant, ces messages contiennent des alarmes, permettant aux récepteurs utilisateur d’exclure un satellite identifié comme défectueux.

Un récepteur GPS classique ne peut accéder directement au service offert par les SBAS. Cependant, le signal géostationnaire étant capté par le récepteur GPS comme tout autre signal GPS, il suffit de doter ce récepteur d’un programme de calcul supplémentaire pour qu’il puisse exploiter les données de correction et d’intégrité qu’il reçoit par l’intermédiaire de ce signal géostationnaire. Il devient dès lors courant de voir des récepteurs GPS équipés de cette fonctionnalité SBAS, aujourd’hui identifiée sous les noms de WAAS et EGNOS.

Si l’apport de cette garantie d’intégrité est une valeur ajoutée primordiale dans les domaines du transport, l’intérêt du WAAS ou d’EGNOS pour les récepteurs GPS grand public réside d’avantage dans les corrections qui sont fournies par ces systèmes, qui améliorent la précision du positionnement GPS seul.

Le tableau 6.2 récapitule les différentes valeurs de précision de positionnement spécifiées dans le standard définissant le service GPS SPS et observées pour le GPS seul et pour le GPS augmenté d’EGNOS.

Tableau 6.2 – Amélioration de la précision GPS avec EGNOS

Précision	GPS seul (valeur spécifiée)	GPS seul (valeur observée)	GPS + EGNOS (valeur observée)
Horizontale (95 %)	36 m	6 m	3 m
Verticale (95 %)	77 m	8 m	3,5 m

Le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)

Le système EGNOS a été développé grâce au financement de l’ESA, de la Commission européenne et d’Eurocontrol, l’organisme européen de contrôle de l’aviation civile. Opérationnel depuis 2004 et couvrant la zone européenne, ce système permet d’améliorer les performances des récepteurs utilisant les signaux GPS. Il donne en outre aux autorités européennes les moyens de contrôler et de garantir ces performances GPS améliorées en Europe.

EGNOS repose sur un vaste segment sol et l’utilisation de canaux de communication embarqués à bord de satellites géostationnaires de télécommunications.

Le signal et les services EGNOS

Le signal EGNOS est conforme au signal standard SBAS en ce qu'il utilise la fréquence L1 du GPS. Il est transmis depuis trois satellites géostationnaires : Inmarsat 3 AOR-E (Atlantic Ocean Region East), Inmarsat 3 IOR (Indian Ocean Region) et Artemis, le satellite technologique de l'ESA.

La zone de service EGNOS ainsi que la couverture des satellites géostationnaires utilisés par EGNOS sont illustrés à la figure 6.6.

Les signaux sont diffusés sur une zone beaucoup plus large que la zone de service. En effet, l'infrastructure EGNOS n'étant dimensionnée que pour couvrir la zone européenne, la qualité et la garantie du service EGNOS n'est assurée que sur cette zone. En dehors, les corrections peuvent être utilisées mais perdent en précision. Cependant, la vaste zone de couverture des satellites géostationnaires offre la possibilité d'extensions en dehors de l'Europe, notamment en Afrique, par l'implantation de stations sol supplémentaires.

Le système EGNOS est conçu pour transmettre des corrections et des messages d'intégrité concernant les satellites GPS et Glonass. Il pourra évoluer afin d'apporter également un complément d'intégrité régionale à Galileo.

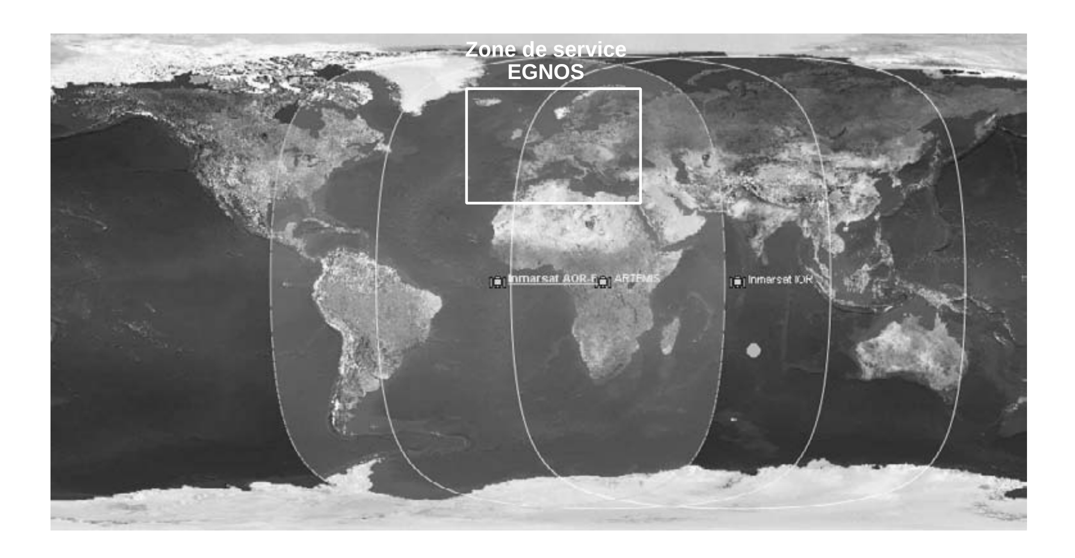


Figure 6.6

Zone de service et couverture des satellites EGNOS

L'infrastructure EGNOS

L'infrastructure du système EGNOS est essentiellement fondée sur des installations au sol. Ces dernières sont constituées des stations et centres suivants :

- Une trentaine de stations de réception RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), déployées sur une zone européenne élargie, qui collectent automatiquement et en permanence les mesures effectuées sur tous les satellites GPS et Glonass visibles depuis leur site d'installation. Les différents sites d'installation sont illustrés à la figure 6.7.
- Quatre centres de contrôle et de calcul MCC (Master Control Center), situés en Europe, où des opérateurs contrôlent en permanence la qualité du service EGNOS et la bonne marche des différents équipements. De puissants calculateurs élaborent en outre les messages de correction différentielle et d'intégrité. Ces centres sont redondés de façon à assurer une résistance à d'éventuelles pannes et à pouvoir faire évoluer le système sans interruption de service.
- Six stations de transmission NLES (Navigation Land Earth Stations), qui assurent la liaison avec les satellites géostationnaires pour diffuser les messages EGNOS vers les utilisateurs.
- Un centre d'évaluation des performances PACF (Performance Assessment and Check-out Facility), situé à Toulouse, où des ingénieurs analysent la qualité du service EGNOS sur de longues périodes et assurent une interface avec l'ensemble des communautés d'utilisateurs.
- Un centre de qualification ASQF (Application Specific Qualification Facility), situé en Espagne, qui permet de valider les nouvelles applications (par exemple de nouvelles procédures d'atterrissage) rendues possibles grâce aux signaux EGNOS.

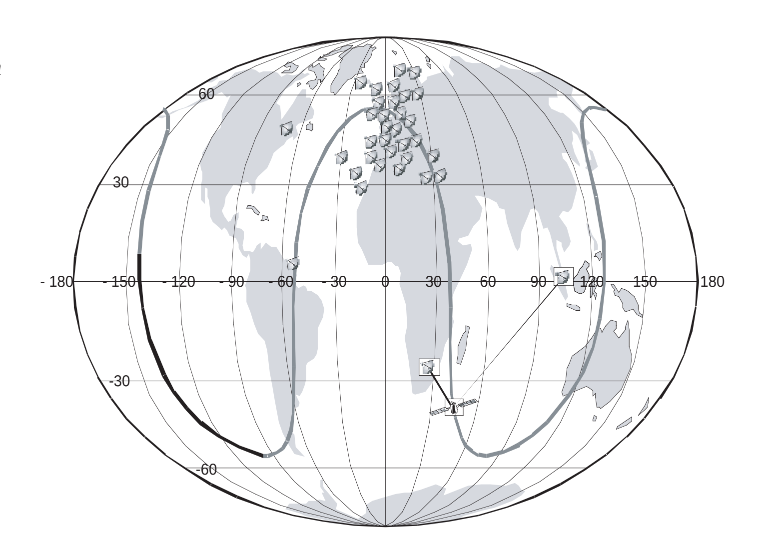


Figure 6.7
Stations sol de réception du système EGNOS avec trace au sol d'un satellite GPS (source Alcatel Alenia Space)

Le système WAAS (Wide Area Augmentation System)

Le WAAS est le système SBAS développé par les Américains et déployé sur leur territoire. La FAA (Federal Aviation Administration) et le DOT (Department of Transport) ont mis sur pied ce programme afin de permettre d'utiliser le GPS à bord des avions pour réaliser des approches de précision. En effet, les exigences de la FAA concernant les performances des systèmes de navigation aérienne (précision, intégrité) ne permettent pas d'utiliser le seul système GPS pour ces phases de vol.

Services et signaux WAAS

Le système WAAS offre son service sur l'ensemble de la zone continentale des États-Unis. Il permet d'améliorer les performances du GPS mais ne couvre pas les satellites Glonass.

Le service initial est fourni au travers de signaux transmis sur la fréquence GPS L1 seule. Des évolutions sont en cours pour transmettre également des signaux WAAS sur la fréquence GPS L5, apportant ainsi une meilleure résistance aux interférences affectant la réception des fréquences L1.

En mars 2006, la FAA a autorisé l'utilisation du WAAS pour des phases d'approche de précision permettant de s'approcher de la piste jusqu'à une altitude de 200 pieds (environ 60 m).

L'infrastructure WAAS

Le WAAS repose sur l'infrastructure suivante :

- Un réseau de vingt-cinq stations de réception WRS (Wide Area Reference Station), réparties sur le territoire américain *(voir figure 6.8)*.
- Deux centres de contrôle et de calcul WMS (Wide Area Master Station), situés sur les côtes est et ouest du pays.
- Plusieurs stations GUS (Ground Uplink Station) de communication avec les satellites WAAS.
- Quatre satellites géostationnaires, qui embarquent un équipement de transmission des signaux WAAS émis par les GUS :
  - Inmarsat POR (Pacific Ocean Region) et AOR-W (Atlantic Ocean Region West), qui transmettent les signaux WAAS sur la fréquence L1 GPS.
  - Telesat Anik F1R et Panamsat Galaxy 15, lancés respectivement en septembre et octobre 2005, qui ont la capacité de transmettre les signaux WAAS sur les deux fréquences GPS L1 et L5.

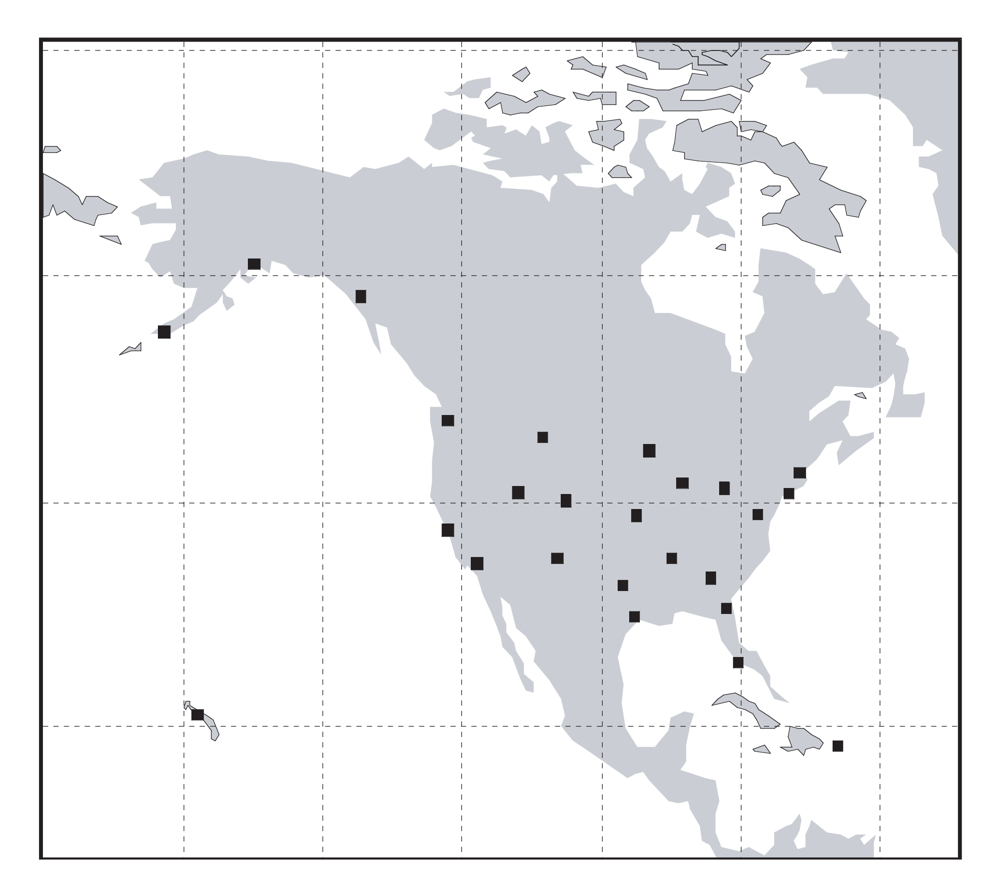


Figure 6.8
Stations sol de réception du système WAAS

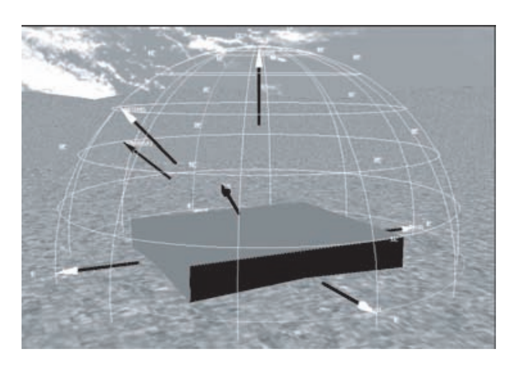
Les systèmes ERIS (External Regional Integrity Service)

Les systèmes de type ERIS reposent sur le même principe que les SBAS quant aux objectifs et aux principes d'architecture, à l'exception du moyen de diffusion, qui est fondé sur les satellites Galileo plutôt que sur des satellites géostationnaires.

La structure des messages diffusés par le système Galileo est en effet conçue pour pouvoir transmettre des données d'intégrité régionale. De ce fait, les services ERIS sont accessibles à partir de récepteurs Galileo, et non GPS comme pour WAAS ou EGNOS.

L'intérêt principal de la diffusion des données d'intégrité régionale par les satellites Galileo réside dans la meilleure couverture qu'ils procurent, en particulier vers les hautes latitudes, pour lesquelles les satellites géostationnaires du WAAS ou d'EGNOS peuvent être rapidement masqués par des obstacles, même relativement bas sur l'horizon.

La figure 6.9 illustre les effets de la latitude sur l'angle de réception des signaux géostationnaires d'EGNOS. Pour un récepteur situé à une latitude telle que celle d'Athènes (à gauche), les signaux EGNOS sont reçus avec une bonne élévation au-dessus de l'horizon, évitant ainsi les masquages. Par contre, ces mêmes signaux ont une bien plus forte probabilité d'être masqués pour un utilisateur situé à une latitude comme celle d'Oslo (à droite).



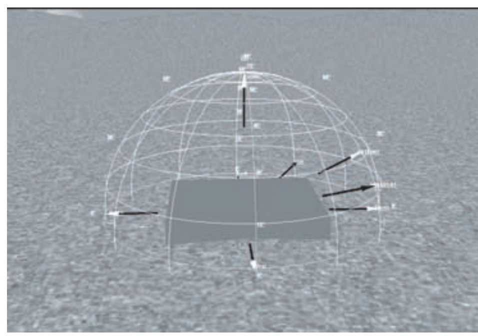
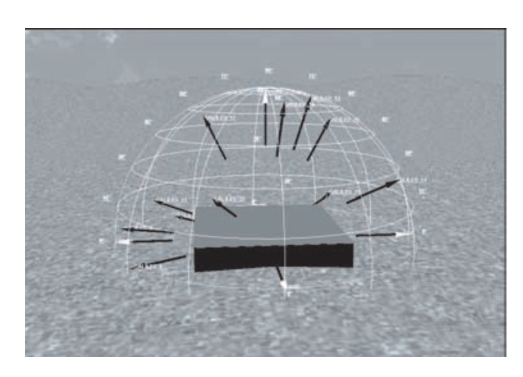


Figure 6.9

Angles de réception des signaux géostationnaires d'EGNOS depuis Athènes, à gauche et Oslo, à droite (source SatOrb, Sup'Aéro)

Les données ERIS pourront être diffusées par les satellites Galileo. La figure 6.10 illustre, pour un récepteur situé à Athènes ou Oslo, les différentes directions depuis lesquelles les données d'intégrité pourront être reçues.



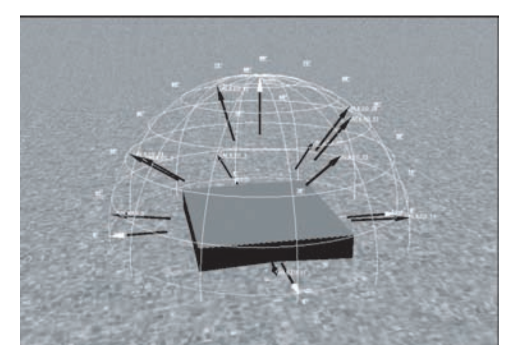


Figure 6.10

Angles de réception des signaux Galileo depuis Athènes, à gauche et Oslo, à droite (source SatOrb, Sup'Aéro)

Avec le développement de Galileo, deux standards se mettent donc en place pour les services d'augmentation régionale, le premier fondé sur les signaux GPS et l'autre sur les signaux Galileo.

Ajoutons que le standard SBAS, en développement depuis plus de dix ans, a été certifié aux États-Unis en 2006 pour des applications de navigation aérienne et que les systèmes WAAS/EGNOS fondés sur ce standard sont opérationnels depuis 2003/2004. De son coté, le standard ERIS est en cours de définition et ne devrait pas être opérationnel avant 2012.

Les systèmes différentiels locaux

La technique d'augmentation locale, ou LAAS (Local Area Augmentation System), repose sur une idée simple, illustrée à la figure 6.11. Une station disposant d'un récepteur, dont la position est parfaitement connue dans un référentiel donné, est capable d'estimer l'écart existant entre sa position calculée avec les satellites (GPS ou Galileo) et sa position vraie. Cet écart inclut toutes les sources d'erreur présentées au chapitre 1, c'est-à-dire les erreurs provenant des satellites, des effets de propagation du signal et du bruit de mesure.

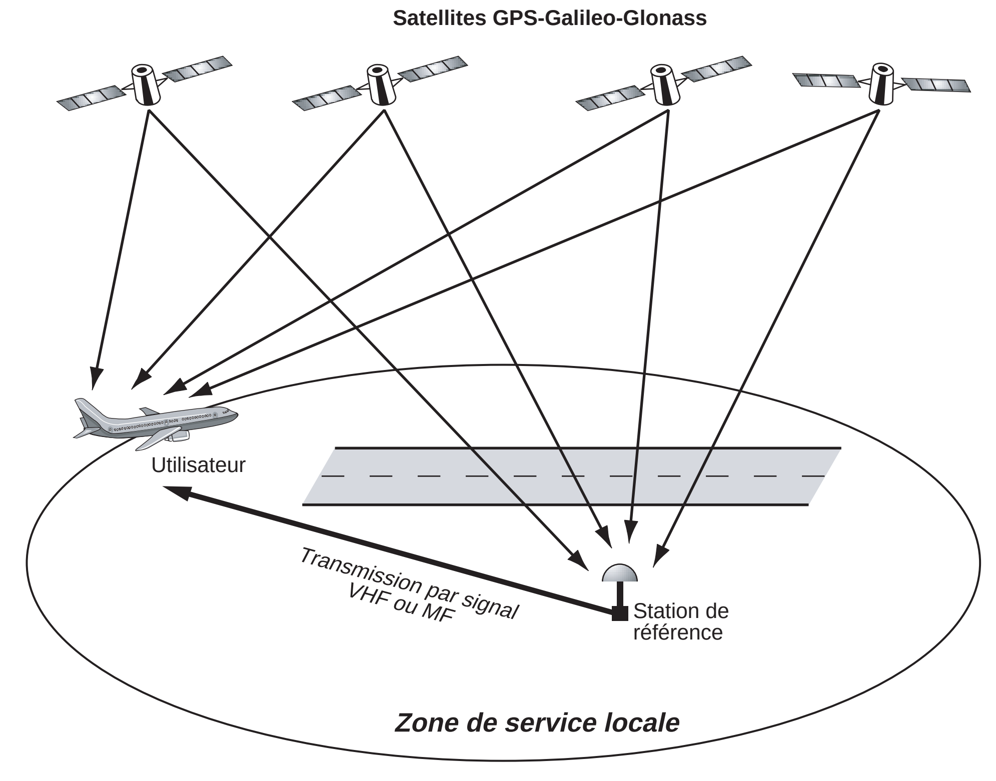


Figure 6.11

Principe du différentiel local

Un récepteur situé à proximité est soumis aux mêmes erreurs, puisque les mêmes satellites sont vus sous le même angle et que les mêmes effets atmosphériques se font sentir. Il suffit donc que la station transmette la valeur de cet écart aux récepteurs situés à proximité pour que ceux-ci réduisent considérablement leur erreur de positionnement en appliquant cet écart sous forme de correction dans leur calcul de navigation.

Cependant, l'erreur de position GPS ou Galileo varie selon que le récepteur utilise tous les satellites en vue ou seulement un sous-ensemble de satellites, certains pouvant être momentanément masqués. Ainsi, la station différentielle et les récepteurs utilisant ses services ne calculent pas forcément leur position avec le même ensemble de satellites. Il n'est dès lors pas possible pour tous les récepteurs utilisateur d'appliquer directement l'écart de position observé par la station différentielle comme correction de la position calculée.

Une possibilité serait de transmettre l'erreur de position observée dans chacune des configurations réduites. La station observant jusqu'à dix satellites pourrait ainsi calculer l'erreur de position en cas d'utilisation de toutes les combinaisons de neuf, huit, sept et jusqu'à quatre satellites. Mais cela conduirait à un nombre de combinaisons très important.

La technique plus communément utilisée, et standardisée par le RTCM *(voir encadré)*, consiste à estimer, au niveau de la station différentielle, quelles sont les erreurs sur chaque mesure en provenance de chaque satellite en visibilité et de transmettre localement ces corrections aux récepteurs utilisateur, lesquels appliquent ces corrections aux satellites utilisés.

Bien sûr, plus le récepteur est proche de la station différentielle, plus les erreurs sont semblables, et plus la position différentielle obtenue par le récepteur est précise.

La technique du différentiel local permet d'atteindre des précisions inférieures au mètre en positionnement horizontal et vertical.

Le standard RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services)

Plusieurs techniques et protocoles ont été proposés pour définir les messages transmis par la station différentielle aux récepteurs utilisateur. Cependant, c'est le protocole élaboré par le RTCM qui s'est le plus largement développé et qui est devenu le standard de fait.

L'intérêt de ce standard est qu'il offre la possibilité aux usagers équipés d'un unique récepteur de bénéficier du même service différentiel local dans toutes les zones où ces services sont délivrés. Ainsi, les transporteurs maritimes ou aériens peuvent naviguer d'un port ou d'un aéroport à un autre et, à l'aide du même équipement, y effectuer des manœuvres d'approche de précision.

Le standard RTCM définit les différents types de messages dans lesquels sont agencées les informations produites par la station différentielle. Ces messages incluent l'identifiant de la station, les corrections différentielles et les données d'intégrité permettant au récepteur utilisateur de connaître, avec une grande confiance, la précision du service qu'il utilise.

Selon les applications, la zone de service autour de la station différentielle locale peut être plus ou moins grande. La navigation aérienne utilise des liens VHF (Very High Frequency) à portée limitée pour transmettre les données de correction entre la station différentielle et le récepteur embarqué sur l'avion. Elle recherche en outre une grande précision dans les phases pour lesquelles le différentiel local est pertinent (approche et d'atterrissage). Le service est ainsi fourni sur une distance maximale de quelques kilomètres.

Pour des applications maritimes utilisant les ondes longues MF (Medium Frequency) pour transmettre les corrections différentielles, la zone de service peut s'étendre sur un rayon de 400 km. Dans ce cas, la précision apportée par le différentiel local est moindre, dans la mesure où les erreurs liées aux effets atmosphériques sont largement décorrélées.

Les systèmes différentiels locaux offrent également la capacité de détecter des anomalies de fonctionnement d'un satellite et d'émettre une alarme le concernant. La zone de service étant locale, le temps de détection et de transmission de l'alarme aux récepteurs utilisateur peut ne pas dépasser deux secondes, alors que les systèmes différentiels régionaux ont besoin d'au moins six secondes. L'intégrité du service est de la sorte assurée avec un temps de réaction extrêmement court.

Associé à une grande précision des corrections, ce service d'intégrité à très faible temps d'alarme permet de développer localement des applications plus exigeantes que celles envisagées pour les systèmes WAAS ou EGNOS. Par exemple, une station différentielle locale située dans un aéroport ou une zone portuaire est parfaitement capable de gérer les approches de précision par tout temps des avions ou navires.

Conclusion

Si le GPS est le système pionnier dans le domaine de la navigation par satellite, les spécificités techniques des différentes applications ainsi que les aspects stratégiques de cette technologie sont à l'origine de la mise en place d'autres systèmes, semblables ou complémentaires.

Cela pose évidemment la question de la compatibilité entre ces différents systèmes et de leur complémentarité pour les utilisateurs, qui font l'objet du chapitre suivant.

7

Interopérabilité entre le GPS, Galileo et Glonass

L'existence de plusieurs systèmes de navigation par satellites GNSS (Global Navigation Satellite System) pose la question de leur interopérabilité, c'est-à-dire de leur capacité à fonctionner ensemble.

L'interopérabilité des systèmes GNSS permet non seulement d'assurer la coexistence des différents systèmes dans leurs zones de service communes, mais également d'offrir des performances accrues aux usagers munis de récepteurs multistandards, c'est-à-dire susceptibles de combiner plusieurs services GNSS.

En particulier, la combinaison des mesures en provenance de systèmes différents dans un même calcul de positionnement offre une bien meilleure disponibilité du service. En zone urbaine, par exemple, un récepteur GPS/Galileo soumis à des masquages importants continuera à obtenir un service de positionnement avec deux satellites GPS et deux satellites Galileo en visibilité, alors que des récepteurs GPS seul ou Galileo seul ne fourniraient plus de positionnement faute d'avoir au minimum quatre satellites en vue.

L'interopérabilité des systèmes GNSS repose sur plusieurs caractéristiques :

- Les référentiels géodésiques : ces points de référence terrestre par rapport auxquels sont fournies les informations de position sont propres à chaque GNSS, ce qui peut se révéler problématique en cas d'utilisation combinée de plusieurs systèmes.
- Les référentiels de temps : chaque GNSS établit sa référence de temps propre, le temps système du GNSS, qui sert de base aux calculs de position effectués par les récepteurs.

- La compatibilité électromagnétique des signaux : il s'agit de s'assurer que, sur les lieux où plusieurs GNSS diffusent leurs services, les signaux d'un GNSS ne perturbent pas la bonne réception des signaux d'un autre GNSS.
- La définition du signal, des messages de navigation et du calcul de la solution de navigation : en cas d'utilisation combinée de plusieurs GNSS, le récepteur doit pouvoir s'adapter au standard du signal défini pour chacun des GNSS.

Nous allons maintenant passer en revue ces différentes caractéristiques et voir en particulier quelles sont leurs conséquences sur l'utilisation combinée du GPS et de Galileo.

Compatibilité des référentiels géodésiques

Nous avons vu au chapitre 1 que les positions fournies par un récepteur GPS ou Galileo ne prenaient leur sens que par rapport au système de référence terrestre utilisé par le système GPS ou Galileo. Ce système de référence est également utilisé pour établir l'ensemble des cartographies utilisées par les récepteurs utilisateur.

Cependant, chaque système GNSS utilise son propre système de référence terrestre. Ainsi, le GPS fournit des positions dans le référentiel géodésique WGS-84 (World Geodetic System-1984), qui a été réalisé par le département de la Défense américain à partir des positions de base propres au système GPS et de constantes fondamentales.

Le système Glonass utilise le référentiel géodésique PZ-90, établi par le département de topographie militaire russe. Quant à Galileo, il utilisera le GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) produit par un organisme géodésique européen à partir des positions de référence des stations du réseau sol Galileo.

Si les systèmes WGS-84 et GTRF sont conçus pour coïncider, à moins de 10 cm près, à la fois entre eux et avec le système international ITRF, le système PZ-90 utilisé par Glonass s'en écarte beaucoup plus.

Un récepteur utilisateur combinant des mesures provenant de satellites GPS et de satellites Galileo est donc assez peu affecté par la différence de référentiel terrestre entre ces deux systèmes. De plus, des paramètres transmis dans les signaux Galileo permettront de corriger et rendre négligeables les erreurs dues à ces écarts de référentiel.

Par contre, un récepteur combinant des données GPS et Glonass doit appliquer un calcul d'ajustement entre ces différentes mesures. Les écarts après ajustement peuvent atteindre aujourd'hui jusqu'à plusieurs mètres mais sont variables en fonction de la position de l'utilisateur sur le globe.

L'utilisation de systèmes différentiels tels que EGNOS permet toutefois de corriger ces écarts. Les corrections différentielles qui rectifient les erreurs de positionnement des satellites GPS et Glonass sont établies sur la base du seul référentiel terrestre utilisé par EGNOS, le WGS-84. Elles intègrent donc également les écarts de référentiel et permettent de les compenser pour l'utilisateur.

Compatibilité des référentiels de temps

Le temps universel UTC (Universal Time Coordinate) est élaboré à partir du temps TAI (temps atomique international), fourni par des horloges atomiques ultrastables, et du temps UT1 fourni par la rotation terrestre.

Le temps TAI est fondé sur le décompte des secondes atomiques. La seconde atomique est définie dans le système international des unités comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133.

Cette définition a permis de réaliser de nombreux étalons atomiques, c'est-à-dire des horloges atomiques servant de référence à la mesure du temps dans des laboratoires spécialisés. Le BIPM (Bureau international des poids et mesures) de Sèvres, près de Paris, est l'organisme international chargé d'établir le TAI. Le TAI n'est pas mesuré sur une horloge étalon unique mais est calculé *a posteriori* en réalisant des statistiques sur un ensemble d'horloges atomiques réparties mondialement dans une cinquantaine de laboratoires de temps et fréquences. Le TAI est une échelle de temps continue, c'est-à-dire qu'il ne subit jamais de correction. On peut le représenter comme une dérive continue et régulière *(voir figure 7.1)*.

Le temps UT1 est fondé sur la rotation terrestre par rapport au Soleil. Nous avons vu au chapitre 1 que la vitesse de rotation de la Terre n'était pas uniforme et qu'elle comprenait des variations régulières. Le temps UT1 est donc corrigé de ces variations. C'est l'IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) qui est en charge d'élaborer le temps UT1. Cependant, le temps UT1 et le temps TAI ne s'écoulent pas exactement à la même vitesse, si bien qu'il peut se créer un écart d'une seconde en un an entre UT1 et TAI.

Ainsi, d'un coté, le TAI fournit un temps régulier et continu, nécessaire pour les applications nécessitant une grande précision et stabilité de datation, et, de l'autre, le temps UT1 fournit le temps commun correspondant à la rotation terrestre, c'est-à-dire aux cycles jour/nuit de vingt-quatre heures.

C'est pour cela que le temps UTC est établi par le BIPM comme une combinaison de ces deux échelles temporelles : le temps UTC est établi par le TAI, mais il est régulièrement recalé d'une seconde de façon à rester égal au temps UT1, à mieux que 0,9 s. C'est l'IERS qui a la charge de déterminer les dates où le temps UTC doit être avancé ou retardé d'une seconde.

Le temps GPS est réalisé par un ensemble d'horloges atomiques opérées par l'USNO (United States Naval Observatory). L'USNO fait partie de l'ensemble des laboratoires utilisés par le BIPM pour déterminer le temps TAI. Le temps GPS est donc continu, comme le TAI, et il ne suit pas les corrections régulières de l'UTC.

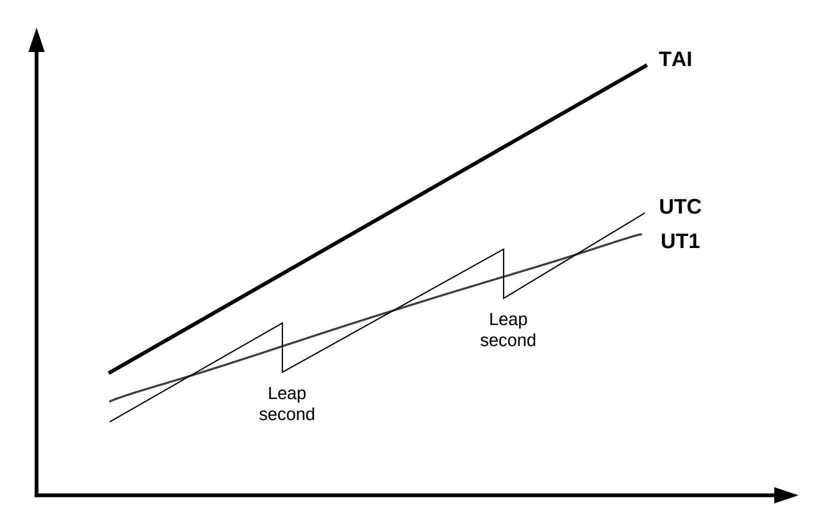


Figure 7.1

Représentation schématique des temps TAI, UT1 et UTC

L'USNO fournit également un temps qui suit les corrections déterminées par l'IERS. Il s'agit du temps UTC(USNO). Ce temps UTC(USNO) ne diffère du temps GPS que d'un nombre entier de secondes qui correspond au nombre de *leap seconds* accumulées depuis l'instant d'origine du temps GPS. Cet instant d'origine du temps GPS, où le temps GPS correspondait au temps UTC(USNO), est le 6 janvier 1980 à 0h00.

L'écart entre le temps GPS et le temps UTC(USNO) est diffusé par les signaux GPS, ce qui permet aux récepteurs GPS de restituer localement le temps UTC(USNO).

Le temps Galileo GST (Galileo System Time) est réalisé par les horloges atomiques situées dans les centre de contrôle mission de Galileo. Il est donc, comme le temps GPS, continu et ne suit pas les corrections apportées régulièrement au temps UTC. Un centre spécialisé évalue cependant régulièrement l'écart entre le temps GST et le TAI. Il fournit ainsi des corrections adéquates aux opérateurs du système Galileo leur permettant d'ajuster le temps GST afin de le maintenir synchronisé avec le temps TAI à mieux que 50 nanosecondes près. L'écart entre le temps TAI et le temps UTC (un nombre entier de secondes) est également diffusé dans les messages Galileo.

Les signaux Glonass fournissent comme référence de temps le temps système Glonass ainsi que le temps UTC(SU).

Un récepteur qui doit combiner les mesures provenant de constellations différentes, par exemple GPS et Galileo, dans un même calcul de positionnement doit donc faire face à des mesures réalisées avec des temps de référence différents. Le calcul de position tel que nous l'avons décrit au chapitre 1 ne convient donc plus, puisque le temps local du récepteur ne peut se synchroniser qu'avec un seul temps système et que, dans ce cas, il en existe deux.

La solution consiste à introduire dans le calcul de positionnement une inconnue supplémentaire : l'écart entre le temps GPS et le temps Galileo.

Le récepteur doit alors déterminer les cinq paramètres suivants :

- les trois paramètres de position ;
- l'écart entre le temps local de l'horloge récepteur et le temps d'un des deux systèmes ;
- l'écart de temps entre les deux systèmes.

Pour obtenir ces cinq paramètres, il lui faut donc cinq mesures, soit cinq satellites en visibilité. La combinaison des mesures GPS et Galileo dans une même solution de navigation peut donc être réalisée avec cinq satellites GPS/Galileo en visibilité.

Ce principe s'applique également pour la combinaison de satellites GPS/Glonass ou Galileo/Glonass.

Cependant, il est prévu d'améliorer encore les performances des systèmes GPS et Galileo par la transmission dans les signaux Galileo, et sans doute GPS, de l'écart entre le temps Galileo et le temps GPS.

Cet écart de temps est calculé par les centres sol de mission Galileo et GPS grâce à la mise en place de mesures communes entre leurs horloges atomiques de référence. Cet écart sera précis à moins de 10 nanosecondes près. Une telle précision permet de combiner les mesures GPS et Galileo avec des erreurs de distance de l'ordre de 1 à 3 m. Cela permettra au récepteur de continuer d'établir une solution de navigation avec seulement quatre satellites en vue, par exemple deux GPS et deux Galileo.

Compatibilité des signaux et des messages

Les signaux et les messages émis par les satellites GPS, Galileo et Glonass sont différents. Un récepteur cherchant à combiner ces différents systèmes doit donc pouvoir s'adapter à ces différences et les rendre invisibles pour l'utilisateur.

Les fréquences d'émission des systèmes GNSS étant très proches les unes des autres, il est possible d'utiliser les mêmes équipements de réception de signaux pour capter les mesures de ces différents satellites. Cependant, la grande proximité des fréquences de ces signaux constitue une difficulté pour la coexistence de ces différents systèmes, qui peuvent se perturber entre eux. Il est donc essentiel d'assurer la compatibilité électromagnétique de ces différents signaux.

En ce qui concerne les messages de navigation, chaque système définit ses propres types de messages, qui doivent donc être exploités de façon spécifique par le récepteur. C'est ce qu'on appelle les standards de navigation GNSS.

Compatibilité électromagnétique des signaux

Les signaux GPS, Galileo et Glonass sont transmis sur des fréquences très proches, parfois même identiques *(voir figure 6.1)*. Ces différents signaux peuvent se perturber entre eux, les signaux d'un autre système apparaissant comme une interférence parasite au niveau des récepteurs utilisateur.

On distingue deux sortes d'interférences :

- **Interférences dans la bande *(in-band).*** Il s'agit des cas où deux systèmes émettent sur des plages de fréquences qui se recouvrent. Les signaux GPS et Galileo émettent sur des plages de fréquences identiques pour les signaux L1 et L5 (GPS) ou E5 (Galileo). Dans ce cas, les techniques d'accès CDMA, c'est-à-dire par division de code, permettent à chaque récepteur d'extraire les mesures en provenance de chaque satellite recherché, à condition que les niveaux de puissance d'émission de chaque satellite soient bien contrôlés. C'est aussi pour cela que les fréquences Glonass, dont les signaux ne sont pas en CDMA, ne se recoupent pas avec les fréquences GPS ou Galileo.
- **Interférences hors bande *(out-of-band).*** Il s'agit d'émissions parasites des satellites en dehors des bandes de fréquences qui leur sont allouées. Ces émissions ont pour origine les caractéristiques des équipements embarqués et sont normalement à de très faibles niveaux de puissance. Les niveaux de ces interférences dépendent de la qualité des équipements des satellites.

La régulation fixant quelles plages de fréquences sont allouées à quelles constellations de satellites incombe aux autorités internationales de régulation des télécommunications. Ces autorités organisent régulièrement des conférences permettant d'évaluer et d'allouer ces fréquences. Des groupes de travail internationaux sont constitués afin d'étudier les différentes demandes et propositions et d'analyser les sources d'interférences induites.

La répartition des fréquences entre GPS, Galileo et Glonass et la définition des niveaux de puissance autorisés a donné lieu à de nombreuses discussions, analyses et négociations afin d'aboutir aux allocations actuelles. Ces allocations préservent le bon fonctionnement de chaque système en présence des signaux émis par les autres.

Interopérabilité des standards GNSS

Le système GPS a défini le premier standard de la navigation par satellite. Le format des messages de navigation ainsi que les processus de calcul de la position du récepteur sont codifiés dans un document normatif élaboré par les autorités américaines et qui s'impose à tous les constructeurs de récepteurs GPS.

Ces standards conditionnent un certain nombre de caractéristiques des services, notamment les temps de démarrage à froid ou à chaud (la définition des messages et de leur séquences de répétition influence directement le temps d'attente de l'utilisateur avant de pouvoir obtenir une première position).

De par sa diffusion mondiale, le standard GPS est devenu la référence en la matière. Le standard Glonass est beaucoup moins utilisé, tandis que le standard Galileo, en cours d'élaboration, apportera une nouvelle diversité.

Le standard Galileo différera du standard GPS pour au moins deux raisons : les services fournis par Galileo seront plus nombreux que les services offerts par GPS (les services Galileo SoL ou SAR n'existent pas sur les signaux GPS), et certaines performances, comme le temps de démarrage, seront améliorées.

Ces différences de standards entre le GPS, Galileo et Glonass ne vont pas sans impacter la complexité du récepteur, dont le processeur doit être capable de traiter des informations différemment selon leur provenance. Cependant, ces différences devraient rester invisibles de l'utilisateur.

En ce qui concerne les systèmes différentiels d'augmentation régionale, un standard international pour les services d'intégrité régionale a été défini sous l'impulsion des autorités américaines. Le même standard SBAS (Satellite-Based Augmentation System) est donc utilisé par les différents systèmes déployés à ce jour, comme EGNOS en Europe, WAAS aux USA ou MSAS au Japon. Cette unicité du standard SBAS permet à un récepteur d'accéder aux services EGNOS en Europe et WAAS aux États-Unis avec les mêmes fonctions de calcul.

Il en est de même du standard RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) des systèmes différentiels locaux.

En résumé, malgré la multiplicité des standards de définition des messages et de leur exploitation, les récepteurs modernes sont capables de traiter indifféremment des satellites GPS, Galileo ou Glonass, ainsi que les signaux d'augmentation régionale ou locale, d'une façon transparente pour l'utilisateur.

Utilisation combinée de GPS et Galileo

Les systèmes GPS et Galileo étant interopérables, les référentiels géodésiques et temporels, ainsi que les signaux et les messages de ces deux systèmes, peuvent être utilisés de façon intégrée par un récepteur conçu à cet effet.

Pour la grande majorité des utilisateurs, il n'y aura donc pas de concurrence entre GPS et Galileo, mais au contraire une complémentarité, qui permettra d'augmenter les performances de positionnement.

Un des effets directs de la possibilité de combiner les mesures GPS et Galileo est l'amélioration considérable des performances géométriques offertes aux utilisateurs : le DOP est amélioré, et la résistance aux masquages (dans les zones urbaines) est fortement renforcée.

La figure 7.2 illustre la répartition sur le globe des satellites des deux constellations à un instant donné.

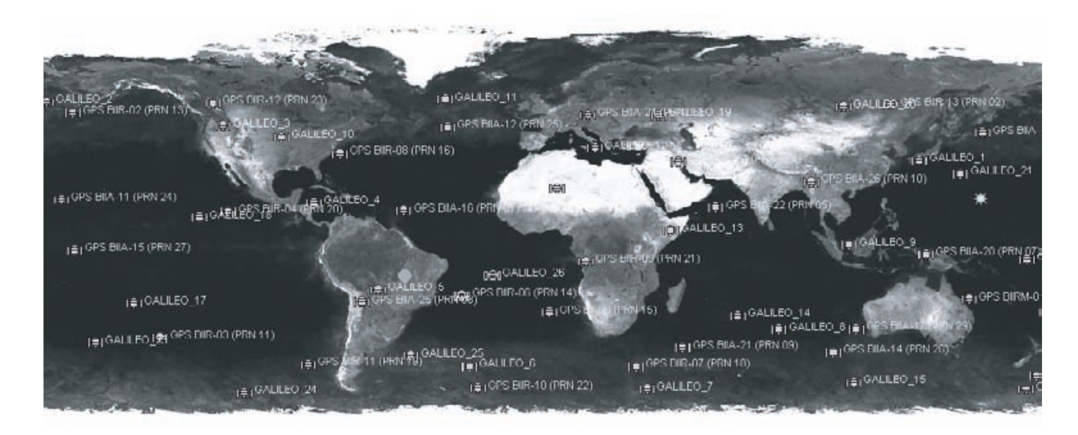


Figure 7.2

Répartition des satellites GPS et Galileo (source SatOrb, Sup'Aéro)

Les figures 7.3 à 7.5 illustrent l'amélioration apportée par l'utilisation combinée du GPS et de Galileo par rapport au GPS seul ou à Galileo seul. Obtenues par simulation, les cartes indiquent la valeur moyenne du VDOP sur le globe.

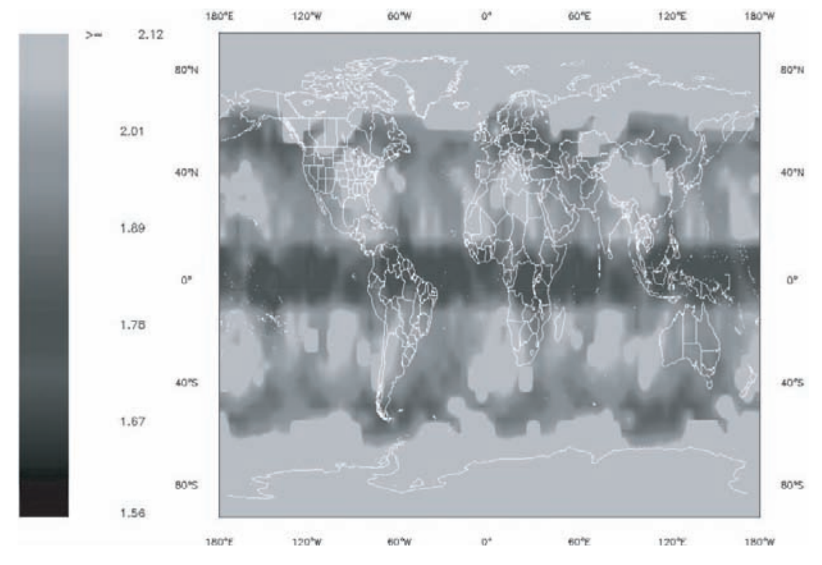


Figure 7.3

Performance géométrique de positionnement vertical (VDOP) avec GPS seul
(source Alcatel Alenia Space)

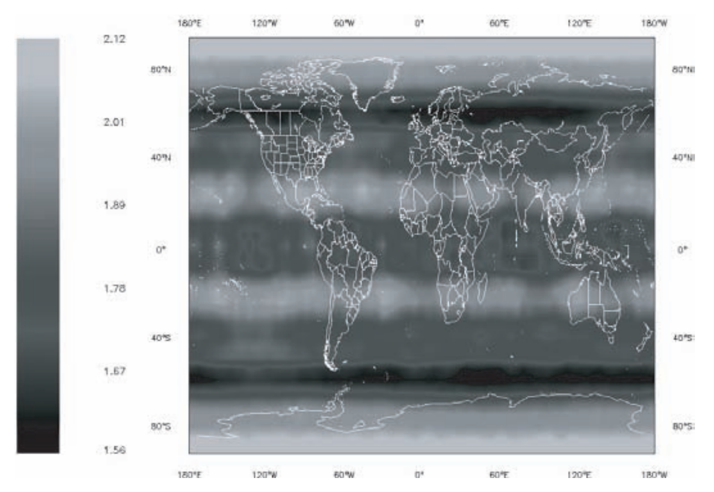


Figure 7.4

Performance géométrique de positionnement vertical (VDOP) avec Galileo seul
(source Alcatel Alenia Space)

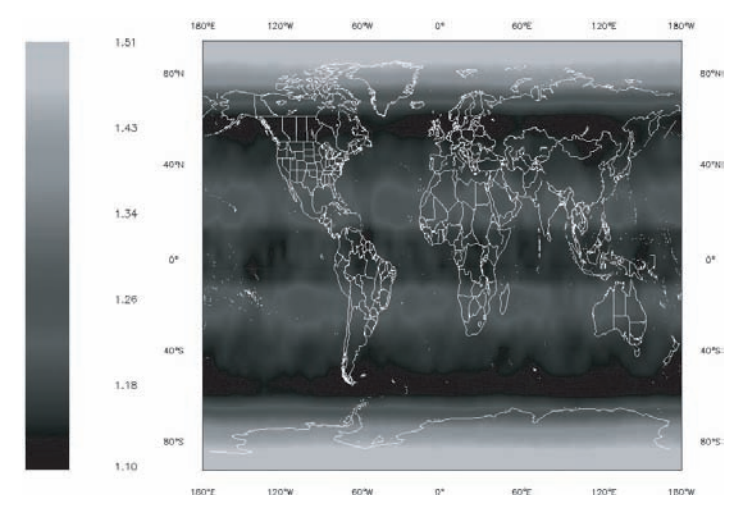


Figure 7.5

Performance géométrique de positionnement vertical (VDOP) avec GPS et Galileo
(source Alcatel Alenia Space)

Les échelles sont identiques pour les illustrations 7.3 (GPS seul) et 7.4 (Galileo seul), indiquant des valeurs du VDOP comprises entre 1,56 et 2,12. L'échelle de la figure 7.5 (GPS + Galileo) est ajustée entre 1,10 et 1,51. La lecture de ces cartes sur l'Europe ou les États-Unis permet de déduire que le positionnement vertical obtenu en combinant GPS et Galileo peut être jusqu'à deux fois plus précis qu'avec GPS ou Galileo seul.

Conclusion

L’interopérabilité est une caractéristique essentielle des systèmes GNSS, qui permet d’assurer la coexistence des différents systèmes et de leurs signaux sur le globe et d’offrir le meilleur des performances aux usagers.

Après l’avènement du GPS, le développement de la navigation par satellite avec Galileo se concrétisera par l’apparition de récepteurs multistandards, permettant aux usagers de bénéficier du meilleur service combinant les signaux des différents systèmes GNSS disponibles.

Conclusion

La navigation par satellite est une nouvelle technologie dont les champs d'application, qui couvrent pratiquement tous les domaines d'activité, restent encore largement à explorer et à développer.

L'importance prise par les applications du GPS démontre clairement le caractère stratégique de cette nouvelle technologie.

Différents systèmes sont déjà à l'œuvre ou en cours de développement pour offrir des services disponibles en permanence dans le monde entier. Loin d'être concurrents, ces systèmes peuvent se combiner pour apporter de meilleures performances aux utilisateurs.

Le GPS, totalement opérationnel depuis 1994, après une vingtaine d'années d'études et développements, est en cours de modernisation et apportera à partir de 2010 de nouveaux services aux performances améliorées.

Glonass, très peu connu du grand public, est maintenu dans un état intermédiaire faute de financements suffisants, ce qui ne lui permet pas de développer des applications aux performances comparables à celles du GPS.

L'Europe fournit un effort important pour mettre en place l'infrastructure de Galileo, dont les services permettront d'étendre largement les applications actuelles fondées sur le seul GPS. Pour mener à bien le développement de Galileo, l'ensemble de l'industrie spatiale européenne a mis en commun ses moyens et ses compétences.

La mise en place de Galileo est programmée pour être progressive : après la production en 2006 des deux premiers satellites Giove A et B, un premier bloc de quatre satellites devrait être opérationnel en 2009, suivi du déploiement complet de la constellation permettant une mise en place progressive des services Galileo à partir de 2010.

Glossaire

Almanach.– Données transmises dans leurs signaux par les satellites GPS et Galileo, permettant au récepteur de déterminer à tout instant les positions approximatives de tous les satellites de la constellation. Les almanachs sont utilisés pour réduire le temps de démarrage du récepteur.

AS.– Anti-Spoofing. Technique utilisée sur les signaux du système GPS, sous contrôle des militaires américains, offrant une meilleure robustesse du service aux usagers habilités.

BIPM.– Bureau international des poids et mesures. Institut en charge d'établir le temps universel (UTC).

BOC.– Binary Offset Carrier. Technique de modulation du signal utilisée par Galileo.

BPSK.– Binary Phase Shift Keying. Technique de modulation du signal.

CDMA.– Code Division Multiple Access. Technique de partage d'une bande de fréquences, permettent à plusieurs satellites d'émettre leurs signaux en même temps. Utilisée pour les signaux GPS et Galileo.

Chip.– Information binaire (0 ou 1) modulant le signal GPS ou Galileo et servant d'élément de base à la constitution des séquences de code qui permettent d'effectuer les mesures de distance entre le récepteur et le satellite.

Code C/A.– Coarse Acquisition code. Émis dans les signaux des satellites GPS, il permet d' effectuer des mesures de distance et d'obtenir une solution de positionnement GPS en accès libre.

Code P(Y).– Precision Code émis dans les signaux GPS, dont l'accès est réservé aux usagers habilités. Il peut être encrypté ; on parle alors de code P(Y).

CS.– Commercial Service. Un des services de Galileo.

DGPS.– Differential GPS. Technique permettant d'améliorer les performances du service GPS à l'aide d'infrastructures supplémentaires déployées au sol.

DME.– Distance Measuring Equipment. Réseau de balises installées au sol émettant un signal permettant aux avions de mesurer leur distance par rapport aux positions connues des émetteurs DME.

DOD.– Department of Defense, États-Unis.

DOP.– Dilution of Precision. Caractérise la géométrie de la constellation à un instant donné et en un lieu donné. Le DOP a une influence directe sur la précision du positionnement. On parle de HDOP (DOP horizontal), VDOP (DOP vertical), TDOP (DOP temporel) et GDOP (DOP global).

Doppler.– Effet dû au mouvement du satellite par rapport à l'usager, qui modifie la fréquence apparente des signaux reçus par le récepteur usager.

DOT.– Department of Transports, États-Unis.

EGNOS.– European Geostationary Navigation Overlay Service. Système européen diffusant depuis des satellites géostationnaires des données calculées au sol, qui améliorent les performances du service GPS, permettant en particulier une utilisation du GPS avec des performances d'intégrité garanties pour des applications de type navigation aérienne.

Éphémérides.– Données transmises dans leurs signaux par les satellites GPS et Galileo, permettant au récepteur utilisateur de déterminer à tout instant les positions très précises de chaque satellite observé.

ERIS.– External Regional Integrity System. Systèmes permettant de contrôler les performances d'intégrité de Galileo sur une zone régionale.

ESA.– European Space Agency, Agence spatiale européenne.

E5 (E5a et E5b).– Fréquences centrées sur 1 191,795 MHz utilisées par les services Open Service et Safety of Life de Galileo.

E6.– Fréquence centrée sur 1 278,75 MHz utilisée par les services Commercial Service et PRS de Galileo.

FOC.– Final Operational Capability. Phase de développement de Galileo au cours de laquelle le système déployé sera complet.

Galileo.– Système européen sous contrôle civil fournissant plusieurs services de positionnement et de datation sur l'ensemble du globe.

Giove.– Satellite prototype du système Galileo. Giove A et Giove B permettent de transmettre un premier signal de test Galileo et de valider en orbite certaines des technologies critiques du développement des satellites opérationnels Galileo.

GIS.– Geographic Information System. Ensemble de données caractérisant la géographie d'une zone particulière.

Glonass.– Global Navigation Satellite System. Système russe sous contrôle militaire fournissant plusieurs services de positionnement et de datation sur l'ensemble du globe.

GNSS.– Global Navigation Satellite System. Nom générique des systèmes de navigation par satellite, comme GPS, Galileo, Glonass, EGNOS ou WAAS.

GPS.– Global Positioning System. Système américain sous contrôle militaire fournissant un service de positionnement et de datation sur l'ensemble du globe.

GST.– Galileo System Time. Temps de référence du système Galileo, réalisé physiquement dans les centres de contrôle au sol de Galileo et utilisé pour synchroniser l'ensemble des signaux des satellites Galileo.

GTRF.– Galileo Terrestrial Reference Frame. Système géodésique utilisé par Galileo, dans lequel le positionnement avec les satellites Galileo est fourni. Il est maintenu proche de l'ITRF à quelques centimètres près.

IERS.– International Earth Rotation Service. Institution en charge de maintenir les modèles et paramètres de rotation de la terre.

IOV.– In-Orbit Validation. Phase de développement de Galileo pendant laquelle le système est déployé partiellement et utilisé pour la validation et les opérations initiales des services Galileo.

ITRF.– International Terrestrial Reference Frame. Système géodésique élaboré en coopération par plusieurs laboratoires géodésiques et utilisé comme standard universel pour le positionnement sur Terre.

LAAS.– Local Area Augmentation System. Système permettant d'améliorer sur une zone locale les performances du service GPS ou Galileo à l'aide d'infrastructures supplémentaires déployées au sol.

LBS.– Location Based Services. Services fondés sur la localisation, combinant la navigation par satellite (GPS ou Galileo) avec les communications mobiles.

L1.– Fréquence centrée sur 1 575,42 MHz utilisée par les services SoL et PRS de Galileo et par le GPS.

L2.– Fréquence centrée sur 1 227,60 MHz utilisée par le service à accès contrôlé GPS PPS.

L5.– Fréquence centrée sur 1 176,45 MHz utilisée par les nouveaux services GPS.

NANU.– Notice Advisory to NAVSTAR Users. Informations diffusées par le centre de contrôle GPS, à destination de tous les usagers du GPS, indiquant les prévisions de retrait et de mise en service des satellites Navstar GPS.

NASA.– National Aeronautic and Space Administration, États-Unis.

NAVSTAR.– Navigation Satellite Timing and Ranging. Satellites utilisés par le système GPS.

OS.– Open Service. Service en libre accès fourni par Galileo.

PPS.– Precise Positioning Service. Service de positionnement précis offert aux usagers habilités du système GPS.

PRN.– Pseudo-Random Noise. Technique utilisée pour la génération des codes GPS et Galileo. Utilisé également pour identifier chaque satellite Navstar GPS en fonction du code qu'il émet dans son signal.

PRS.– Public Regulated Service. Service de positionnement fourni par le système Galileo, dont l'accès est contrôlé.

RAIM.– Ranging Autonomous Integrity Monitoring. Technique implémentée dans les récepteurs, permettant de détecter et d'isoler un satellite défaillant lorsque plus de quatre satellites sont en visibilité.

RMS.– Root Mean Square. Valeur statistique permettant de caractériser la précision du positionnement à partir d'un ensemble de positions fournies par un récepteur.

SA.– Selective Availability. Dégradation volontaire de la précision du positionnement GPS, contrôlé par les opérateurs du GPS.

SAR.– Search and Rescue. Service d'assistance fourni par le système Galileo aux usagers équipés de balises de détresse et d'un récepteur Galileo.

SBAS.– Satellite Based Augmentation Systems. Systèmes d'augmentation propres au GPS, permettant d'améliorer et de garantir les performances. Exemples de SBAS : EGNOS, WAAS.

SoL.– Safety of Life. Service de positionnement fourni par le système Galileo, destiné aux applications exigeant une grande sûreté de fonctionnement (par exemple la navigation aérienne).

SPS.– Standard Positioning Service. Service de positionnement offert en libre accès par le système GPS.

TAI.– Temps atomique international. La référence internationale la plus précise pour la mesure du temps, élaborée à partir de l'observation de vibrations atomiques.

UHF.– Ultra-High Frequency. Bande de fréquences où se trouvent les signaux GPS et Galileo.

USNO.– United States Naval Observatory. Institution qui a notamment en charge l'établissement du temps système de référence du GPS, utilisé pour synchroniser l'ensemble des signaux des satellites Navstar GPS.

UTC.– Universal Time Coordinates. Temps de référence international établi par le BIPM, fondé sur le TAI mais maintenu cohérent avec la rotation terrestre (à travers l'introduction régulière de *leap seconds*).

VOR.– VHF Omnidirectional Range. Système mettant en œuvre un réseau de balises au sol, utilisé pour la navigation aérienne.

WAAS.– Wide Area Augmentation System. Système américain diffusant depuis des satellites géostationnaires des données calculées au sol qui améliorent les performances du service GPS, permettant en particulier une utilisation du GPS avec des performances d'intégrité garanties pour des applications de type navigation aérienne aux États-Unis.

WGS-84.– World Geodetic System 1984. Système géodésique utilise par le GPS, dans lequel le positionnement par les satellites GPS est fourni.

Index

T

U

V

W